



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

OPINNÄYTETYÖ

Lastauksen ja kuljetuksen optimointi Siilinjärven kaivoksella digitaalisia tuotannonohjausjärjestelmiä hyödyntäen

TEKIJÄ: Aatu Kokkarinen

| | | | |
|--|-----------|--------------------|------|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | | | |
| Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma | | | |
| Työn tekijä(t) Aatu Kokkarinen | | | |
| Työn nimi Lastauksen ja kuljetuksen optimointi Siilinjärven kaivoksella digitaalisia tuotannonohjausjärjestelmiä hyödyntäen | | | |
| Päiväys | 29.3.2018 | Sivumäärä/Liitteet | 37/3 |
| Ohjaaja(t) Lehtori Teemu Räsänen, yliopettaja Pasi Pajula | | | |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) E. Hartikainen OY | | | |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Yara Suomi Oy:n Siilinjärven kaivoksella on käytössä informaatioteknologiajätti Hexagonin toimittama Jigsaw -kaivoksenohjausjärjestelmä (Jigsaw Fleet Management System), joka mahdollistaa kaluston keskitetyn reaaliaikaisen tarkkailun, hallinnan ja ohjauksen. Ajojärjestelijällä on Jigsaw-järjestelmän käyttäjänä suuri mahdollisuus tehostaa tuotantoa, jos tätä järjestelmää käytetään oikein. Jigsaw-järjestelmässä on sisäänrakennettuna ominaisuuksina kehittyneet tuotannon optimointialgoritmit, joita ei kuitenkaan Siilinjärvellä ole otettu käyttöön, vaan tuotantoa ohjataan yhä perinteisenä käsiohjauksena.</p> <p>Työn tilaaja oli maarakennusyritys E. Hartikainen Oy, joka vastaa louheen lastauksesta ja kuljetuksesta Siilinjärvellä. Työ toteutettiin tutkimustyönä, jonka pohjalta koostettiin raportti ja lyhyt kirjallinen ohje Siilinjärven toimipisteen ajojärjestelijöiden käyttöön.</p> <p>Tavoitteena työllä oli selvittää Jigsaw-järjestelmän optimointialgoritmien käyttöä estävät haasteet Siilinjärvellä ja selvittää haluttu optimointijärjestelmän käytön taso, jolla päästäisiin parhaisiin tuloksiin juuri tällä työmaalla. Käytännössä tämän olisi tullut johtaa lähes välittömään tuotantomäärän nousuun käytettäessä samoja resurssimääriä. Optimoinnin käyttöönoton vaikutukset mitattiin Jigsaw-järjestelmästä kerättävistä raporteista, josta saadut tulokset kerättiin yhteen ja analysoitiin. Lopputuloksena pyrittiin saamaan mahdollisimman selkeä yhteenveto optimoinnin käytön hyödyistä ja haitoista, jonka pohjalta päätettiin parhaasta toimintatavasta tulevaisuudessa. Optimoinnin käytön helpottamiseksi laadittiin ohje ajojärjestelijöiden käyttöön, millä pyrittiin tasaamaan mahdollisia eroja lukuisten eri käyttäjien välillä.</p> <p>Kolmen kuukauden mittaisen optimointikoeajon jälkeen voitiin havaita lastauskoneiden ja maansiirtoautojen hukka-aikojen laskua. Lastauskoneiden keskimääräinen odotusaika laski koeaikana 4,86 prosenttiyksikköä sitä edeltävään tasoon verrattuna, ja maansiirtoautojen jonotusaika laski vastaavasti 0,81 prosenttiyksikköä. Molemissa hukka-aikaprosenteissa päästiin alle kuluvaan vuoden keskiarvon. Koeajo ajoittui olosuhteiltaan verrattain haastavaan aikaan, joten kaikkia muutoksia tuotannon tunnusluvuissa ei voida lukea suoraan optimoinnin käytön syyksi. Merkittävin osa tunnusluvuista kuitenkin koki positiivista muutosta, joten optimoinnin käyttöä tullaan jatkamaan toimipisteellä myös tulevaisuudessa.</p> | | | |
| Avainsanat Avolouhos, lastaus, kuljetus, optimointi, Jigsaw, tuotanto | | | |
| | | | |

| | | | |
|---|---------------|------------------|------|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | | | |
| Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology | | | |
| Author(s) Aatu Kokkarinen | | | |
| Title of Thesis Optimization of loading and hauling using digital production management systems in the Siilinjärvi open-pit mine | | | |
| Date | 29 March 2018 | Pages/Appendices | 37/3 |
| Supervisor(s) Mr Teemu Räsänen, Senior Lecturer; Mr Pasi Pajula, Principal Lecturer | | | |
| Client Organisation /Partners E. Hartikainen OY | | | |
| <p>Abstract</p> <p>The Yara Suomi OY's Siilinjärvi open-pit mine uses the Jigsaw production management system developed by Hexagon. It enables the user to monitor, control and guide the operators of the equipment in the mine. The dispatcher who controls the system has a huge impact on the production. The Jigsaw system has an inbuilt optimization algorithm which has not been utilized at the mine site. So far, the production has been run manually and fully locked. The aim of this project was to start utilizing the Jigsaw system's optimization algorithm and measure the effects this has on the production. The mine site has a few local challenges that have been hindering the use of the optimizer and needed to be solved to complete the project. The client organisation for this project was the mine contractor E. Hartikainen Ltd. which is the main contractor responsible for loading and hauling at the Siilinjärvi open-pit mine.</p> <p>The aim of this project was to clarify the challenges preventing the use of the optimizer algorithms at the work site, make the necessary changes to allow the use of the optimizer and then use the optimizer for three months and measure the results it has on the production.</p> <p>At the beginning of the project the necessary changes to the working habits were made and written instructions on the proper use of the optimizer were developed and made available to the dispatchers to standardize the dispatching process further. After that the Jigsaw system's optimization algorithms were allowed to guide the hauling process in the mine for the duration of the test. In practical terms, this should have led to increased production while still using the same resources. The effects of using the optimizer were monitored with Jigsaw system's report building tools. The analysis of these results should have led to a clear conclusion on whether the use of the optimizer is preferable or not.</p> <p>As a result of the three-month test period of using mainly the optimizer for guiding the haul trucks to their next loading point, the equipment experienced less hang and wait times compared to the level before. The average hang time for the loading units decreased by 4.86 percentage points and the waiting time for haul trucks decreased by 0.81 percentage points. Both values were under the current year's average. The test period was done during somewhat challenging conditions so not every change in production figures can be attributed to the use of the optimizer. In most of the key performance indicators, however, there was positive change so the use of the optimizer will be continued at the work site.</p> | | | |
| <p>Keywords</p> <p>Open-pit mine, loading, hauling, optimization, Jigsaw, production</p> | | | |
| | | | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 6 |
| 1.1 | Tausta ja tavoitteet | 6 |
| 1.2 | Määritelmät | 7 |
| 1.3 | Yhteistyökumppanit | 7 |
| 2 | TOIMINTA SIILINJÄRVEN KAIVOKSELLA..... | 8 |
| 2.1 | Maarakennusyhtiö E. Hartikainen Oy | 8 |
| 2.2 | Yara Suomi Oy..... | 8 |
| 2.3 | Siilinjärven kaivos | 8 |
| 3 | REAALIAIKAINEN TUOTANNONOHJAUSJÄRJESTELMÄ | 10 |
| 3.1 | Hexagon Mining ja Leica Geosystems | 10 |
| 3.2 | Jigsaw-järjestelmä | 10 |
| 3.3 | Käyttö Siilinjärvellä..... | 11 |
| 3.3.1 | Työnjako ajojärjestelijöiden ja vuorotyönjohtajien välillä | 11 |
| 3.3.2 | Kalusto | 12 |
| 3.4 | Raportit..... | 12 |
| 4 | YARAN YHTEISTYÖ JIGSAW-JÄRJESTELMÄSSÄ | 13 |
| 4.1 | Rikastamon vaatimukset malmille | 13 |
| 4.2 | Pitoisuusalueet ja geologia | 13 |
| 4.3 | Suunnittelu ja tarkkailu | 14 |
| 5 | AUTOMAATTINEN OPTIMOINTI..... | 15 |
| 5.1 | Periaate | 15 |
| 5.2 | Haasteet | 16 |
| 5.3 | Hyödyt | 18 |
| 6 | TEHDYT KOEAJOT SIILINJÄRVELLÄ..... | 19 |
| 6.1 | Tutkimusmenetelmät ja järjestelyt | 19 |
| 6.2 | Tulokset | 19 |
| 6.3 | Havainnot..... | 28 |
| 7 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 30 |
| 8 | KEHITYSEHDOTUKSET HAVAINTOJEN POHJALTA..... | 32 |
| 9 | YHTEENVETO | 33 |
| | LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT..... | 34 |

| | |
|--|----|
| LIITE 1: ESIMERKKI JVIEW-TIETOKANNASTA OTETUSTA EXCEL-TIEDOSTOSTA..... | 35 |
| LIITE 2: ESIMERKKI JVIEW-TIETOKANTAAN LUODUSTA RAPORTISTA..... | 36 |
| LIITE 3: ESIMERKKI J-VIEW-RAPORTIN TAVASTA ESITTÄÄ OPTIMOINTIMÄÄRÄÄ..... | 37 |

1 JOHDANTO

1.1 Tausta ja tavoitteet

Siilinjärven kaivoksella louheautojen ja lastauskoneiden ohjaukseen on hankittu Jigsaw-tuotannon-ohjausjärjestelmä. Sen avulla voidaan keskitetysti valvoa ja opastaa kaikkea sen pariin liitettyä työkalustoa. Käytännössä tämä tapahtuu tietokonejärjestelmän avulla, joka on verkkoyhteydessä kentällä olevien työkoneiden hyteissä oleviin tietokoneisiin. Näihin asennetut näytöt kertovat koneen kuljettajalle esimerkiksi seuraavan ajo- tai lastauskohteen. Jigsaw-järjestelmän täyttä potentiaalia ei silti ole otettu toimipisteellä käyttöön. Sen sisäänrakennetun optimointialgoritmin käyttö on jäänyt kokeiluasteelle, vaikka suoranaista estettä sen käytölle ei pitäisi olla. Yhtenä suurimpana esteenä onkin ollut henkilöstön vastahakoisuus sopeutua uuteen tapaan ohjata kuljetuskalustoa työmaalla, alkaen aina koneenkuljettajista lähtien. Tähän mennessä kalustolle annettavat osoitukset on hoidettu käsin, joten oikein määritetyn tietokoneohjauksen tulisi oletettavasti tuottaa parempia tuloksia. (Pelttari, 2017-10-15.)

Jigsaw-järjestelmä vaatii verrattain suuret tuotantomäärät ollakseen kannattava, eikä useimmilla tuotantolaitoksilla ole vaadittavia resursseja sen käyttöönottoon. Perusteita tällaisen järjestelmän käytölle on sen tarjoamat helpotukset tuotannonohjaukseen, kalustonhallintaan ja ennen kaikkea tuotannon optimointiin. Siilinjärvellä on havaittu toiminnassa olevan vielä parantamisen varaa, ja esimerkiksi kaluston hukka-aikaa ei olla saatu halutulle tasolle. Hukka-ajalla tarkoitetaan tässä yhteydessä töissä olevan kaluston odotus- ja jonotusaikaa. Tähän liittyvien raporttien tarkastelua kuitenkin vaikeuttaa käyttäjien ja ajojärjestelijöiden huolimattomuus kaluston "tilojen" vaihdon välillä. (Pelttari, 2017-10-15.)

Jigsaw-järjestelmä on asennettu Siilinjärvellä suurimpaan osaan maansiirtoautoista ja lastauskoneista. Ainoastaan pienikokoisimmat koneet on jätetty digitaalisen järjestelmän ulkopuolelle, sillä niiden käyttöasteet ovat suhteessa liian pieniä asennus- ja ylläpitokustannusten perustelemiseksi. Tämä työ tulee osaltaan selvittämään optimointiin liittyviä haasteita vain tämän kaluston osalta, ja etsimään mahdollisia ratkaisuja haasteiden helpottamiseksi. Mittavan kalustomäärän organisointi siten, että kaikki kalusto toimisi mahdollisimman lähellä optimitehoa vaatii nykyisin käytännössä jatkuvaa seurantaa. Ihanteellisimmassa tilanteessa tuotannon optimointi olisi automaattista. Tuotannon ohjausta automatiikalla on kokeiltu eri intensiteeteillä aikaisemminkin, mutta lopullista siirtymistä tähän ajatusmalliin ei ole tapahtunut, vaan edelleen luotetaan merkittävimmissä osin ns. "lukukoihin", joilla samat autot ohjataan jatkuvasti ajamaan saman lastauskoneen luo. Tällöin autonkuljettajien on helpompi pysyä halutulla reitillä, mutta toisaalta työnjohtajien ja ajojärjestelijöiden laatimat ajo-ohjeet saavat jopa kohtuuttoman suuren merkityksen tuotannon sujuvuuden järjestämisessä. (Pelttari, 2017-10-15.)

Tämän työn tavoitteena on käydä läpi Jigsaw-järjestelmän automaattisen optimoinnin käyttöä estävät seikat Siilinjärven toimipisteellä, tehdä tarvittavat korjaavat toimenpiteet optimointiajon helpotta-

miseksi, ottaa Jigsaw:n optimointialgoritmit halutulla tavalla käyttöön, sekä erilaisia tuotantoa mittaavia raportteja käyttäen selvittää onnistuneen optimointiajon vaikutus tuotantoon. Lopputuloksena laaditaan kirjallinen kooste oikeista toimintatavoista ajojärjestelijän/vuorotyönjohtajan työssä, jolla saadaan Jigsaw-järjestelmästä mahdollisimman suuri hyöty irti kaluston hukka-ajan vähentämisen, sekä tuotannon tehostamisen suhteen.

1.2 Määritelmät

| | |
|---------------|---|
| Murska | Malmikiven kippauspaikka, johon syötetty kivi kulkeutuu karkeamurskan läpi siiloon ja jatkaa kulkuaan prosessissa kohti rikastamoa. |
| Välivarasto | Malmin varakippauspaikka murskan lähellä. |
| Malmi | Mineraalipitoisuuksiltaan taloudellisesti hyödynnettävissä oleva kivi. |
| Raakku | Sivukivi mitä ei pystytä hyödyntämään rikastamalla, pääasiassa läjitykseen siirrettävää, mutta myös rakennusmateriaalina käytettävää kiveä. |
| Kaato | Yksittäinen lastattavissa oleva räjäytetty kenttä. Voi sisältää useita eri materiaali- ja pitoisuusalueita. |
| Pitoisuusalue | Malmialue joka sisältää tietyn pitoisuuden eri mineraaleja/alkuaineita. |
| Pääkuokka | Yksi viidestä Siilinjärven toimipisteen suurimmista lastauskoneista. |
| Lukko | Maansiirtoauton lukitseminen Jigsaw-järjestelmässä, pakottaen sen palaamaan aina saman lastauskoneen luo kippauksen jälkeen. |
| Haamukalusto | Lastaus- tai kuljetuskalusto johon ei ole asennettu Jigsaw-järjestelmää. |
| Joptimizer | Jigsaw-tuotannonohjausjärjestelmän sisäänrakennettu optimointialgoritmi |

1.3 Yhteistyökumppanit

Pelttari, Mikko, Työmaainsinööri, Siilinjärvi.
 Maarakennusyhtiö E. Hartikainen OY, Siilinjärvi.
 Yara Suomi OY

2 TOIMINTASIILINJÄRVEN KAIVOKSELLA

Siilinjärvellä toimii Yaran omistama Länsi-Euroopan ainoa fosfaattikaivos ja Suomen suurin avolouhos. Kaivoksen yhteydessä sijaitsevat apatiittirikastamo, sekä tehdasalueet joissa tuotetaan pääasiassa lannoitteita ja fosforihappoa. Tehdastoiminta on aloitettu vuonna 1969 ja kaivostoiminta 1979. (yara.fi)

2.1 Maarakennusyhtiö E. Hartikainen Oy

E. Hartikainen Oy on yksi Suomen suurimmista maarakennusalan yksityisistä toimijoista työllistäen nykyisin jo yli 460 henkilöä eri puolilla Suomea. Yritys aloitti toimintansa vuonna 1965 ja on siitä lähtien vakinnuttanut asemansa luotettavana suuren luokan toimijana, jonka laaja kalustokanta ja osaava henkilökunta mahdollistavat mittavienkin projektien läpiviemisen tehokkaasti. Kaluston huolto ja korjauspalvelut toimivat myös ympäri Suomea, ja esimerkiksi Siilinjärvellä voidaan huoltaa kalustoa jatkuvasti varmistaen työnteon keskeytymättömyys. E. Hartikainen on erikoistunut kaivostoimintaan, suurien massamäärien käsittelyyn, teollisuuden pohjarakentamiseen ja infrarakentamiseen. E.Hartikaisella on tämän hetkistä urakoista merkittävimpinä: Siilinjärven kaivos, Kevitsan kaivos Sodankylässä, Punasuon ja Uutelan kaivokset Sotkamossa, Horsmanahon kaivos Polvijärvellä ja Terrafame Oy:n kaivos Sotkamossa. E.Hartikainen harjoittaa myös maarakennuksesta erillisenä toimintona autokauppaa Suomessa omistaen useita toimipisteitä ympäri Suomea. (hartikainen.com)

2.2 Yara Suomi Oy

Yara Suomi Oy on Yara International ASA:n tytäryhtiö, joka omistaa Suomessa Siilinjärven lisäksi kolme muuta tuotantolaitosta: Uusikaupungin, Kokkolan ja Harjavallan laitokset. Yhteensä Yara työllistää Suomessa noin 1300 henkilöä, joista noin 400 toimii urakoitsijana. Yara kaikkine tytäryhtiöineen on erikoistunut lannoitteiden ja kemiallisten tuotteiden tuotantoon. (yara.fi)

2.3 Siilinjärven kaivos

Siilinjärven kaivoksella louheen kuormaus- ja kuljetusurakasta vastaavana yrityksenä toimii maarakennusyhtiö E. Hartikainen OY. Ensimmäinen urakkasopimus kaivostoiminnan aloittamisesta tehtiin E. Hartikaisen kanssa vuonna 1979 ja nykyinen sopimus Yara Suomi Oy:n kanssa jatkuu vuoden 2021 loppuun asti. Urakkaan kuuluu kiviaineen poraus, rikotus, kuormaus, kuljetus ja vastaanotto muiden töiden ohella. E. Hartikaisen sivuillaan julkaiseman tiedon mukaan nykyinen vuosituotanto on noin 7 milj. m³ kiveä. Siilinjärven toimipisteellä E. Hartikainen työllistää keskimäärin 160 henkilöä, mutta henkilöstön määrässä on tietty määrä kausiluontoista vaihtelua kesän ollessa kiireisintä aikaa rakennus- ja maanpoistourakoille. (hartikainen.com)

Räjätöyksistä vastaa Yaran oma henkilöstö. Käytännössä E. Hartikainen toimii aliurakointisuhteessa Yaralle, ja jokapäiväistä työtä toteutetaan tiukasti Yaran tekemien suunnitelmien mukaan. Saaduista suunnitelmista poiketaan vain Yaran kaivosinsinöörien luvalla. Kaivosteollisuudelle ominaiseen tapaan kaivos itsessään on perustettu palvelemaan paikallista rikastamoa, joka taas toimii osana

Yaran lannoite- ja happotehdasta Nilsiantien varressa. Kaivosinsinöörit pyrkivät varmistamaan sopivan malmikiven jatkuvan syötön rikastamoon, ja E. Hartikainen järjestää määrättyjen kivien kuljetuksen prosessiin parhaaksi katsomallaan tavalla. Yaran ja E. Hartikaisen yhteistyötä helpottamaan ja yleensäkin tuotantoa tehostamaan aina kiven laadun varmistamisesta lähtien on Siilinjärvelle hankittu Leica Geosystemsillä kehittämä Jigsaw-koneohjausjärjestelmä. (Kosonen, 2017-11-3.)

3 REAALIAIKAINEN TUOTANNONOHJAUSJÄRJESTELMÄ

Suuret avolouhokset vaativat yleensä myös mittavat kalustomäärät. Usein jopa kymmenien maansiirtoautojen ja lastaus-/vastaanottokoneiden yhtäaikainen operointi ja tarkkailu vaativat onnistuakseen myös kehittyneet tietojärjestelmät. Ennen langattomien järjestelmien yleistymistä kaluston ohjaaminen hoidettiin perinteisesti näköalapaikalta radiopuhelimien välityksellä, mutta nykyisin suurimmat avolouhokset käyttävät lähes poikkeuksetta jotain markkinoilla olevaa digitaalista tuotannonohjausjärjestelmää. Tavoitteena näillä järjestelmillä on yhdistää kaivoksen eri osatoiminnot jatkuvaksi prosessiksi, millä pyritään takaamaan rikastamolle tasainen ja pitoisuuksiltaan oikea syötevirta. Käytetyimpiä markkinoilla olevia järjestelmiä ovat Modular Miningin kehittämä DISPATCH, Caterpillarin MineStar ja Leica Geosystems (Hexagon) Jigsaw. (Paalumäki, Lappalainen ja Hakapää 2015, 359.) Siilinjärvellä käyttöön otettu Hexagon Miningin kehittämä Jigsaw-järjestelmä on myös hankittu palvelemaan juuri tätä tarkoitusta.

3.1 Hexagon Mining ja Leica Geosystems

Hexagon Mining on osa ruotsalaista Hexagon-konsernia, joka on yksi johtavista informaatioteknologiaratkaisuja teollisuudelle tuottavista yrityksistä. Sen tuotteet yhdistävät sensoreita, ohjelmia, tietokantoja ja asiakkaan työdataa luoden tuotannonsuunnittelua ja -ohjausta mahdollistavia järjestelmiä. Hexagon Miningin pääkonttori sijaitsee Yhdysvalloissa, mutta sen toimistoja on ympäri maailmaa. Yhteensä Hexagon työllistää yli 17000 työntekijää 50:ssä eri maassa ja sen liikevaihto on noin 3,3 miljardia USD. (hexagonmining.com)

Leica Geosystems Oy on Suomessa toimiva Hexagon-konsernin tytäryhtiö, ja se on keskittynyt tuottamaan kokonaisratkaisuja asiakkaansa tarpeisiin. Sen palveluihin kuuluu erilaisten mittaus- ja paikannuslaitteiston ja ohjelmistojen toimitus ja tukipalvelut. (leica-geosystems.fi)

3.2 Jigsaw-järjestelmä

Hexagon Miningin kehittämä Jigsaw-järjestelmä on erityisesti avolouhosten käyttöön tarkoitettu reaaliaikainen tietojärjestelmä, joka mahdollistaa kaivokselle mm. kalustolaivueen hallinnan, tuotannon optimoinnin, korkean tarkkuuden paikannuksen ja monien toimintojen automatisoinnin käyttäen hyväksi GPS-paikannusta ja langattomia tietoverkkoja. Se soveltuu erityisesti maansiirtoautojen, lastauskoneiden ja poravaunujen ohjausjärjestelmäksi, mutta voidaan tarvittaessa laajentaa myös muun kaluston kattavaksi. Esimerkiksi tankkausautot, tienhoitokalusto sekä muu kaivokselle keskeinen kalusto voidaan ottaa osaksi järjestelmää. Tällaisen reaaliaikaisen monitorointijärjestelmän tärkeimpänä etuna on yksinkertaisesti mahdollisuus maksimoida kalustosta saatava hyöty minimoimalla tarpeeton hukka-aika tuotannon eri vaiheissa. Samalla myös helpotetaan tuotannonsuunnittelua ja -ohjausta, sekä parannetaan työn turvallisuutta. (hexagonmining.com)

Kriittistä näiden järjestelmien toiminnalle on koko kaivoksen kattava tietoverkko, sekä tietokanta datan keräystä varten. Tämän avulla saadaan reaaliaikaista dataa kaikkien kaivoksen eri toimintojen

käytettäväksi, sekä helpotetaan tuotannosuunnittelun toteutumista. Järjestelmät perustuvat yleensä satelliittipaikannukseen, mutta ne keräävät tarvittaessa myös paljon muutakin tietoa työkohteiden järjestelmistä. (Paalumäki yms. 2015, 359-360.) Kaikkea tätä tietoa hyödyntäen voidaan toimintaa kaivoksella ohjata ja optimoida esimerkiksi kaluston reitinvalinnan tai huoltojärjestelyjen suhteen (Pelttari, 2017-10-15).

3.3 Käyttö Siilinjärvellä

Siilinjärven kaivoksella on yhteistyössä Yara Suomi Oy:n ja E. Hartikainen Oy:n välillä otettu käyttöön Jigsaw-tuotannonohjausjärjestelmä. Merkittävimpään osaan E. Hartikaisen kalustosta on asennettu Leica Geosystems:n kehittämä kosketusnäytöllinen monitori ja siihen liittyvä tietokone, sekä sen tarvitsema 3G- ja GPS-järjestelmä. Siilinjärven alueella 3G-verkon kattavuus on riittävä kaivoksen tarpeisiin, eikä paikallisen WLAN-verkoston asentamiseen ole ollut tarvetta. Samoin GPS-yhteydet ovat alueella pääsääntöisesti hyvät, joten ns. keinosatelliitteja ei ole tarvinnut alueelle vielä suunnitella. Hetkellisiä katkoksia yhteyksissä niin 3G- kuin GPS-yhteyksien osalta tapahtuu päivittäin, mutta järjestelmä on kykenevä toimimaan pitkiäkin aikoja ilman yhteyttä, tallentaen tietoa ajoneuvon tietokoneeseen yhteyden palautumista varten. (Pelttari, 2017-10-15.)

Jigsaw-järjestelmä näyttää koneenkuljettajalle reaaliaikaisen kaivoksen karttanäkymän ja ohjaa ajamaan oikeaan paikkaan. Lastauskoneen kuljettajille näkymä näyttää lisäksi oikean lastausalueen ja neuvoo kuljettajaa sen sisältämien materiaalien rajoista. Kaikkien järjestelmään liitettyjen koneiden sijainti, tila ja kohde ynnä muiden tietojen kanssa näytetään keskitetysti kaivoksella sijaitsevan ohjaamohuoneen näytöillä, mistä ajojärjestelijän on helppo tarkkailla ja ohjata tuotantoa haluamallaan tavalla. Järjestelmä mahdollistaa myös kommunikoinnin kuljettajien ja työnjohtajien välillä, jolloin esimerkiksi työnjohto voi lähettää erikoisohjeita yksittäisille kuljettajille, tai vastaavasti kuljettajat voivat raportoida kentällä havaituista poikkeavista asioista. Kaikki tämä parantaa toiminnan tarkkuutta, tehokkuutta ja turvallisuutta, samalla edesauttaen tiimityöskentelyä. (Pelttari, 2017-10-15.)

3.3.1 Työnjako ajojärjestelijöiden ja vuorotyönjohtajien välillä

Ajojärjestelijä ja vuorotyönjohtaja johtavat kaivoksen jokapäiväistä toimintaa yhteistyönä. Ajojärjestelijä työskentelee digitaalisen Jigsaw-ohjauksen parissa toimiston ohjaushuoneessa ja vuorotyönjohtaja toimii pääsääntöisesti kentällä varmistaen työskentelyolosuhteiden toimivuutta. Ajojärjestelijä on lisäksi ensimmäisenä yhteydessä Yara:n tuotantoinsinööreihin suunnitelmia koskevissa asioissa, eli voidaan sanoa ajojärjestelijän olevan suurin yksittäinen välikäsi tilaajan (Yara) ja itse urakoitsijan työntekijöiden välillä. Lisäksi ajojärjestelijä on käytännössä yksin vastuussa Jigsaw-järjestelmän ope-roinnista ja tuotannon tehokkuuden valvomisesta, mikä tarkoittaa huomattaviakin tulospäätöksiä eri käyttäjien välillä. Mainittakoon kuitenkin, että myös jatkuvasti muuttuvat olosuhteet vaikuttavat osaltaan saatuun tulokseen, mutta ajojärjestelijän tehtävä on myös toivottomalta tuntuissa tilanteissa pyrkiä saamaan suurin mahdollinen hyöty irti käytettävissä olevista resursseista. Toimintatapojen yhtenäistäminen ja tietokonealgoritmeihin pohjautuvan automaattisen optimoinnin käyttö

mahdollisesti tasoittaisi eroja eri käyttäjien välillä ja karsisi syntyvien virheiden määrää ajojärjestelyssä. (Enbuske, 2017-11-1.)

3.3.2 Kalusto

E. Hartikainen Oy omistaa käytännössä kaikki poraukseen, lastaukseen ja kuljetukseen liittyvät koneet Siilinjärven kaivoksella. Poravaunut on tällä hetkellä jätetty Jigsaw-järjestelmän ulkopuolelle, mutta merkittävimpään osaan lastaus- ja kuljetuskalustosta on asennettu kuvailtu Jigsaw-laitteisto. Jigsaw-järjestelmä on asennettu Siilinjärvellä 12 kappaleeseen Caterpillar 785D maansiirtoautoja, seitsemään kappaleeseen Caterpillar 777F maansiirtoautoja, sekä viiteen kaivinkoneeseen ja kahteen pyöräkuormaajaan. Mainitut viisi kaivinkonetta ovat painoluokaltaan 190t – 290t ja niistä käytetään tämän työn yhteydessä nimitystä pääkuokat. (Enbuske, 2017-11-1.) Tässä työssä tarkastellaan erityisesti Joptimizerin käytön vaikutuksia louheen lastauksessa olevien pääkuokkien hukka-aikoihin, sillä ne muodostavat suurimman osan tuotannosta kaivoksella. Myös maansiirtoautojen ajankäyttöön ja hukka-aikoihin tullaan kiinnittämään huomiota.

Maansiirtoautoihin ja pyöräkuormaajiin on asennettu käytännössä yhtenevä laitteisto, mikä mahdollistaa koneen GPS-seurannan siviilikäytöstä tutulla tarkkuudella, mutta tuotannon tärkeimmän tekijän muodostaviin pääkuokkiin on asennettu paranneltu korkean tarkkuuden GPS-järjestelmä. Tämä mahdollistaa kauhan sijainnin määrittämisen reaaliajassa senttimetrin tarkkuudella, minkä avulla voidaan lastata tarkastikin määrättyjen alueiden sisältä juuri tietyntaista materiaalia. Sekä koneen kuljettaja, että ajojärjestelijä näkevät saman näkymän, missä selkeästi esitetään koneen ja kauhan sijainti kaadon alueella. (Peltari, 2017-10-15.)

3.4 Raportit

Osana Jigsaw-järjestelmää on mahdollista hankkia myös Siilinjärvellä oleellisena osana tuotannon tarkkailussa käytettävä Jview-raporttityökalu. Se on palvelin pohjainen järjestelmä, jolla on käytössään kaikki Jigsaw-koneiden keräämät tiedot, ja se pystyy käyttäjän laatimien parametrien mukaisesti esittämään halutut tiedot tuotannosta jopa reaaliajassa. Lisäksi sillä pystytään myös laatimaan erilaisia liukuvia mittareita kuvaamaan tehokkuuslukuja esimerkiksi yksittäisiltä lastauskoneilta, ja tätä kautta vertailemaan muuttuvien olosuhteiden vaikutusta tuotantoon. Molemmat ovat oleellisia työkaluja auttamaan päätöksentekoa koskien jokapäiväistä työtä. (Peltari, 2017-10-15.) Jview:tä käytetään tässä työssä tärkeimpänä työkaluna tuotantoarvojen vertailuun.

4 YARAN YHTEISTYÖ JIGSAW-JÄRJESTELMÄSSÄ

Jigsaw-tuotannonohjausjärjestelmä on hankittu Siilinjärvelle yhteistyössä Yaran ja E. Hartikaisen kanssa. Sen tuoma pääasiallinen hyöty kaivoksen tuotannon kannalta on tarkempi malmilaadun varmistaminen, ja tätä kautta rikastamon tuotanto tehostuu. Rikastamon osatessa ennakoita tulevan malmin laatua saadaan suurempi osa malmista talteen. (Kosonen, 2017-11-3.)

4.1 Rikastamon vaatimukset malmille

Malmintuotanto Siilinjärvellä on moniin muihin kaivoksiin verrattuna monimutkainen. Kohtuullisen heikkojen malmipitoisuuksien vuoksi vuorokauden aikana joudutaan yhdistämään eli ”blendaamaan” eri puolilta kaivosaluetta tulevia malmikiviä tarvittavien pitoisuuksien saavuttamiseksi. Tällainen noin yhden vuorokauden aikana kerättävä malmikivierä kasataan kolminkertaisen murskauksen jälkeen rikastamon läheisyydessä sijaitsevalle tasausvarastolle erillisiksi kasoiksi. Kasakoko pyritään pitämään mahdollisimman suurena, mieluiten yli 30 000 tonnissa, jolloin yhteen kasaan kerätään malmia useammasta eri kaadosta juurikin haluttujen pitoisuusarvojen saavuttamiseksi kasalle. (Kosonen, 2017-11-3.) Optimoinnin ja suunnittelun kannalta tällaiset eri puolilta kaivosta keräiltävät suhteellisen pienet malmikivierät ovat vaikeimpia esimerkiksi kuljetusmatkojen ja lastauskoneiden vaihdellessa huomattavasti lyhyelläkin aikavälillä, joskus useitakin kertoja vuoron aikana (Pelttari, 2017-10-15).

Tasausvarastokasojen pitoisuusarvot on määritetty tarkkaan rikastamon asettamien vaatimusten perusteella. Laadukkaan rikasteen tuottamiseksi kasan on täytettävä vaatimukset, joita ovat esimerkiksi malmikiven sisältämä apatiitti- ja karbonaattipitoisuus. Huonosta syötteestä seuraa yleensä suoraan pienentynyt saantiprosentti sekä huonolaatuisempaa rikastetta, jota ei välttämättä saada markkinoitua eteenpäin jatkojalostettavaksi. Lisäksi kahden peräkkäisen kasan pitoisuudet eivät saa erota toisistaan huomattavasti, joten tuotannonsuunnittelulla on suuri merkitys rikastamon toiminnan kannalta. (Kosonen, 2017-11-3.)

4.2 Pitoisuusalueet ja geologia

Siilinjärven kaivos koostuu kahdesta noin viiden kilometrin päässä toisistaan olevasta louhoksesta, ja käytännössä koko kaivosalueen geologiset esiintymät ovat tarkkaan tiedossa. Nykyisten havaintojen perusteella kaivostoimintaa on arvioitu jatkettavan vuoteen 2035 saakka, mutta toiminnan uskotaan jatkuvan myös sen jälkeen jossain muodossa. (Kosonen, 2017-11-3.)

Kaadon tullessa poraukseen otetaan koko kaadon alueelta havainnot siinä esiintyvistä kivilajeista metrin tarkkuudella, sekä tarvittava määrä laboratorionäytteitä malmipitoisuuksien määrittämiseksi. Yhdessä aikaisemmin suoritettujen kairausten ja soijaporausten kanssa saadaan muodostettua kattava ja tarkka käsitys jokaisen kaadon sisältämistä kivilajeista ja laaduista. Näiden laatu tietojen perusteella kaadot pienitään Jigsaw-järjestelmässä polygoneihin, pyrkien siihen että jokainen yksittäinen polygoni sisältäisi vain yhdentyyppistä materiaalia. Siilinjärvellä kuitenkin kaadot usein sisältävät

tuotannollisesti katsoen jopa kuutta eri materiaalia, jotka on yleensä määritelty niiden sisältämien raakku- ja malmipitoisuuksien mukaan. (Kosonen, 2017-11-3.) Periaatteessa tilanne, jossa kuormattava materiaali vaihtuu jokaisen lastattavan auton kohdalla, on mahdollinen, mikä vaikeuttaa tuotannon optimointia huomattavasti (Enbuske, 2017-11-1).

4.3 Suunnittelu ja tarkkailu

Tuotannonsuunnittelu Siilinjärvellä pohjautuu suoraan edellä käsiteltyyn geologiseen tietoon. Suunnittelua tehdään alkaen koko kaivoksen elinkaarisuunnittelusta, tarkentuen vaihe vaiheelta aina yksittäistä vuoroa koskevaksi toimintaohjeeksi. (Kosonen, 2017-11-3.) Jokaisen vuoron alkaessa on siis selvää, mitä työvaiheita vuoron aikana tullaan tekemään. Optimoinnin kannalta vaikeimpia vuoroja ovat esimerkiksi ne, joissa joudutaan tekemään useita lastauskoneen siirtoja tai vaihtamaan kuljettajia koneiden välillä. Tyypillisesti mahdolliset konesiirrot yms. pyritään tekemään vuoronvaihtojen tai muiden seisokkien aikana, jolloin niiden vaikutukset tuotantoon jäävät mahdollisimman pieniksi. (Enbuske, 2017-11-1.)

Tärkeä osa Jigsaw-järjestelmän tuomasta hyödystä on sen mahdollistama toteutuneen tuotannon tarkkailu ja seuranta. Jokainen kuljetettu kuorma jättää tarkat tiedot tapahtumasta järjestelmään, ja jälkikäteen voidaan katsoa esimerkiksi tietyn auton kippaamien kuormien täsmällinen sijainti kartalla. Tällä on yhä tärkeämpi rooli Yaran ja E. Hartikaisen yhteistoiminnassa, sillä se helpottaa esimerkiksi tuotantomäärien suunnittelua, tarkkailua ja laskutusta. Optimoinnin käyttö ei tule vaikuttamaan tuotannon seurantaan, sillä lastauskoneiden ja kippauspaikkojen sijainnit pysyvät edelleen määrättyinä. (Peltari, 2017-10-15.)

5 AUTOMAATTINEN OPTIMOINTI

Jigsaw tuotannonohjausjärjelmässä on sisäänrakennettu kaivostuotannon optimointityökalu Joptimizer. Se on suunniteltu ohjaamaan koko kalustoa ja materiaalin siirtämistä kaivoksessa perustuen monimutkaisiin matemaattisiin algoritmeihin. Oikein määriteltynä ja ohjattuna se minimoi kustannuksia ja maksimoi tuotannonmäärät ohjaten käytettävissä olevaa kalustoa parhaalla mahdollisella tavalla. Vertailukohtana Joptimizerin käytölle pidetään ns. lukittua ajoa, jolloin maansiirtoautot lukitaan palaamaan aina tietyn lastauskoneen luo, ja tietyn lastauskoneen lastaama materiaali lukitaan ohjautumaan aina tiettyyn kippauspaikkaan. Tällainen lukittu ajo pystyy yleensä oikein suunniteltuna saavuttamaan halutut tuotantotavoitteet, sekä vaatii yleensä verrattain vähän tarkkailua ja ohjausta kaivoksessa. Jos taas järjestelmän lukot poistetaan ja annetaan Joptimizerin lähettää jokainen yksittäinen auto parhaalle mahdolliselle kuokalle sekä kippauspaikalle, saadaan kaluston käyttöasteita parannettua ja myös tuotantotavoitteiden tulisi ylittyä. (Pelttari, 2017-10-15.)

5.1 Periaate

Afrapoli ja Askari-Nasab kertovat artikkelissaan "Mining fleet management systems: a review of models and algorithms" tuotannonohjausjärjestelmän päätavoitteena olevan yleensä optimoida kaivoksen tuotantoa ja tehokkuutta käyttäen reaaliaikaista dataa. Tarkemmin sanottuna siis maksimoida tuotantoa, minimoida välivarastointia, syöttää materiaalia halutusti rikastamoon ja saavuttaa haluttu sekoitus eri malmilaatuja. Yleinen lähestymistapa on monitasoinen optimointi, jossa jokaisen tason ratkaisua käytetään seuraavan tason laskennassa, ja jossa ongelma jaetaan kolmeen peräkkäiseen aliongelmaan. Nämä aliongelmien ovat (1) lyhyimmän matkan mallintaminen, (2) maansiirtoautojen ja lastauskoneiden sijoittamisen optimointi ja (3) reaaliaikainen maansiirtoautojen osoitusten optimointi. Lyhyimmän matkan (Best path) mallin luomisessa määritetään lyhin matka jokaisen kahden pisteen välille kaivoksessa. Koneiden sijoittamisen optimointi sijoittaa kuljetusresurssit lastauskohteisiin maksimoiden autojen yleistuottavuuden. Reaaliaikainen osoitusten optimointi käyttää staattista algoritmia määrittääkseen optimaalisen materiaalivirran jokaiselle reitille lastaus- ja kippauspaikkojen välillä vastatakseen tuotantotavoitteisiin. Tällainen ohjelmointi osoittaa auton oikeaan kohteeseen auton pyytäessä seuraavaa kohdetta tavalla, joka minimoi poikkeamat tuotantotavoitteista. (Afrapoli ja Askari-Nasab 2017, 1 – 2.)

Afrapolin ja Askari-Nasabin kuvailemalla tavalla myös Jigsaw-järjestelmän toiminta perustuu järjestelmään piirrettyyn tieverkostoon, joka voidaan mallintaa kuvaamaan kaivoksen todellista tieverkostoa metrien tarkkuudella. Tieverkostoon piirretään lastauspaikat, kippauspaikat sekä muut tuotantoon liittyvät kohteet. Toiminnaltaan ja ulkonäöltään järjestelmä muistuttaa perinteistä GPS-järjestelmää, jonka oleellisena osana on oikean ajoreitin näyttäminen kuljettajalle. Tähän tieverkostoon pohjautuen järjestelmä laskee lyhyimmän reitin minkä tahansa kahden pisteen välille. Yleisesti Afrapolin ja Askari-Nasabin mukaan tässä laskennassa käytetään esimerkiksi Dijkstra-algoritmia (Afrapoli ja Askari-Nasab 2017, 3).

Kaluston sijoittaminen ja tuotannon optimointi voidaan hoitaa Afrapolin ja Askari-Nasabin mukaan linear programming (LP) ohjelmalla. Tällöin saadaan optimoitu tuotantotavoite tietylle aikavälille ja kamalla se kahteen erilliseen osaan. Ensimmäinen osa optimoi operaation koko tuotantomäärät, ja toinen osa maksimoi kaluston tuotannon minimoimalla tuotantotavoitteet toteuttavat materiaalimäärät. Jälkimmäinen osa tuottaa teoreettisen kokonaissuunnitelman joka ottaa huomioon tuotannolliset ja operationaaliset rajoitteet. Tätä mallia luomiseen voidaan käyttää esimerkiksi simplex –metodia, ja sitä käytetään myöhemmin referenssisuunnitelmana reaaliaikaisten maansiirtoautojen osoitusten laadinnassa. (Afrapoli ja Askari-Nasab 2017, 5.)

Esittelemässään mallissa LP ongelman ratkaisun jälkeen Afrapolin ja Askari-Nasabin mukaan käytetään dynaamista ohjelmointia (DP) yksittäisten osoitusten antamiseen maansiirtoautoille. Tätä varten luodaan kaksi listaa: lista kuljetuskalustoa tarvitsevista lastauskoneista sekä lista autojen kippaustapahtumista ja kippauspaikalle matkalla olevista autoista. Lisäksi määritetään odotettu aika, milloin kukin reitti vaatii seuraavan maansiirtoauton. Eniten autoja tarvitseva reitti on se, jolla tämä odotettu aika on lyhyin. Tämä reitti määrittää siis myös eniten autoja tarvitsevan lastauskoneen, sillä reitin päässä on luonnollisesti jokin lastausyksikkö. Seuraavaksi formuloidaan hävityt tonnit uudeksi kriteeriksi parhaan auton löytämiseksi. Tämän kriteerin avulla etsitään auto, joka kattaa eniten hävittyjä tonneja eniten kuljetuskapasitettia vaativalta lastauskoneelta. Tämän jälkeen reitti jolle auto lähetettiin, muuttuu listalla viimeiseksi, ja prosessi toistetaan, kunnes kaikki autot ovat saaneet osoituksen. (Afrapoli ja Askari-Nasab 2017, 5.)

Afrapolin ja Askari-Nasabin kertovat artikkelissaan tällaiseen ohjelmointiin pohjautuvan tavan optimoida tuotantoa omaavan tiettyjä vahvuuksia, kuten sen luoma liukuva tapa ennustaa seuraava tarvittava osoitus ja kaivoksen tilan seuranta on aina ajan tasalla. Heikkouksina kuitenkin mainitaan mallin kykenemättömyys ennustaa autojen määrän muutosta järjestelmässä, vaan ainoastaan aikaisemmin lastaukseen lähetetyt autot löytyvät laskennassa käytetyiltä listoilta. Toinen tällaisen järjestelmän heikkous on se, että se ei periaatteessa ole dynaamiseen ohjelmointiin (DP) perustuvaa ongelmanratkaisua, vaan puhtaasti reagoivaa järjestyksessä tehtävää aliongelmien ratkaisua. (Afrapoli ja Askari-Nasab 2017, 5 – 6.)

Afrapoli ja Askari-Nasab käsittelevät artikkelissaan muitakin akateemisia tapoja lähestyä avokaivos-ten lastaukseen ja kuljetukseen liittyvää optimointia, mutta varmuutta esimerkiksi Jigsaw-järjestelmän käyttämistä metodeista ei ole tällä hetkellä julkisesti saatavilla. Jigsaw- järjestelmää käyttää heidän mukaansa 130 eri kaivosta ympäri maailmaa (Afrapoli ja Askari-Nasab 2017, 4).

5.2 Haasteet

Siilinjärven kaivoksella on ollut Jigsaw-järjestelmän asennuksesta lähtien tiedossa sen tuomat mahdollisuudet tuotannon optimoinnissa, mutta lopullista siirtymistä Joptimizerin käyttöön ei ole tapahtunut. Lukkojen poistamista ja Joptimizerin varassa ajoa on yritetty satunnaisilla kokeiluilla, mutta

kokemukset ovat olleet usein negatiivisia. Huomattava osa kokeiluista on epäilty olleen tehty virheel-
lisillä toimintatavoilla, eikä myöskään ole varmuutta siitä, miten ajojärjestelijä on Joptimizerin mieltä-
nyt. (Pelttari, 2017-10-15.)

Optimointiajon muita suurimpia haasteita Siilinjärvellä on ajojärjestelijä Enbusken mukaan:

- Laajalle hajautettu lastauskalusto, ja usein autonkuljettajan tulee saada oikea osoitus seuraavalle lastauskoneelle lähes välittömästi kippauksen jälkeen lähteäkseen oikealle reitille.
- Katkokset 3G-yhteydessä, milloin autot eivät voi saada uusia osoituksia järjestelmältä.
- Jigsaw-järjestelmän ulkopuolella toimivia ns. "haamuautoja ja -kuokkia" on edelleen Siilinjärvellä käytössä. Näiden ottaminen osaksi tuotantoa vaikeuttaa tuotannon seuraamista ja optimoinnin käyttöä huomattavasti, sillä ajojärjestelijän on lähes mahdotonta seurata niiden liikkeitä kaivoksessa.
- Autojen määrä on yleensä rajoittava tekijä tuotannonsuunnittelussa, sillä kuljetusmatkat eri materiaaleille ovat kasvaneet jo verrattaen pitkiksi. Jokainen tuotannossa oleva kuokka vaatisi vähintään viisi CAT 785D kokoluokan louheautoa, jotta kuokka pystyisi toimimaan edes lähellä omaa optimitehoaan.
- Mainitut kuljetusmatkat voivat vaihdella huomattavasti jopa tunneittain. Pahimmissa tapauksissa matka pystyy puolittumaan tai kertaantumaan tavalla, jota on erittäin vaikea ennustaa. Lastausrintaman edetessä kaadossa voi materiaali, ja sen myötä myös kippauspaikka ja kuljetusmatka, vaihtua useita kertoja vuoron aikana.
- Tuotannossa olevien louheautojen määrää on usein vaikea säätää vastaamaan sen hetkistä tilaa. Toisaalta Siilinjärvellä autojen määrä on mm. kalustorikkojen, kuljetusmatkojen pituuksien ja lastauskoneiden suuren tehon takia usein riittämätön. Tilanteet joissa kuljetuskalustoa olisi syytä jättää pois tuotannosta ovat erittäin harvinaisia.
- Malmikiven ensisijainen kippauspaikka murska pystyy ottamaan vastaan maksimissaan yhden lastauskoneen kuormat, jos lastauskone toimii täydellä kapasiteetilla. Päivittäin malmikiveä tulee kuitenkin lastata mainitulla tavalla ympäri kaivosaluetta sopivan seoksen aikaansaamiseksi, joten käytännössä kyseeseen tulee vain yhden malmikohteen lastaaminen kerrallaan. Jos malmikiveä lastataan enemmän mitä murska pystyy käsittelemään, kipataan ylimääräiset kuormat välivarastoon. Tämä aiheuttaa aina lisäkustannuksia, sillä välivaraston kuormat joudutaan myöhemmin lastaamaan uudestaan ja kuljettamaan murskaan.
- Useita erilaisia vuorojärjestelmiä on käytössä, joihin sisältyy myös eri aikoihin pidettävät kahvi- ja ruokatauot. Tämä hankaloittaa vuorojen suunnittelua ja optimointia, sillä kalusto jää viettämään taukoa tai vaihtamaan vuoroa eri aikoihin. Periaatteessa Jigsaw-järjestelmään pystyttäisiin asettamaan taukojen ajankohdat, jolloin Joptimizer kykenisi ohjaamaan kaluston tauolle oikeaan aikaan. Käytännössä tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä esimerkiksi kuljetuskaluston kentällä viettämät tauot sotkevat järjestelmän toimintaa.
- Kuljetuskalustoa/louheautoja on käytössä eri kokoluokilla, ja osaa koskevat tietyt rajoitukset ajo-reittien ja kippauspaikkojen suhteen. Päivittäin on käynnissä useitakin eri projekteja, joihin pystytään käyttämään vain pienempiä CAT 777F -kiviautoja.

- Operaattorien ja ajojärjestelijöiden vaihteleva huolellisuus järjestelmän käytössä aiheuttaa helposti tuotannonmenetyksiä. Onnistuneet optimointiajot vaativat järjestelmän oikeaoppista ja aktiivista käyttöä, mikä on lähtökohtaisesti Siilinjärvellä hyvällä tasolla, mutta joukossa on vielä havaittu olevan lisätukea tarvitsevia yksilöitä.

Nämä ongelmat ovat tässä yhteydessä toimipisteen henkilökunnan kesken tiedostettu, ja niihin pyritään tarvittaessa löytämään ratkaisuja, mikäli tarpelliseksi katsotaan. Periaatteena pidetään kuitenkin sitä, että optimoinnin tulee palvella tuotantoa, eikä päinvastoin.

5.3 Hyödyt

Siilinjärven kaivoksella on kaivostoiminnalle ominaisesti korkeat pääomainvestoinnit, sekä käyttö- ja huoltokustannukset, joten kaluston tehokas hyödyntäminen aina niiden ollessa tuotannossa on erittäin tärkeässä asemassa liiketoiminnan kannattavuuden varmistamisessa. Joptimizerin onnistunut käyttö kaluston ohjaamisessa vähentäisi teoriassa lastauskoneiden ja louheautojen hukka-aikaa, mistä seuraisi suoraan kasvanut tuotantomäärä samoilla resursseilla. Suuren kokoluokan kalustolla toimittaessa on kaikenlainen hukka-aika verrattaen suuri kuluerä, sillä tuotannon menetyksen lisäksi kertyy käynnissä olevalle kalustolle matalan rasituksen käyttötunteja, mikä taas aiheuttaa huoltojen muuttumista ennenaikaisiksi. (Peltari, 2017-10-15.)

Tämän työn tarkoituksena on kartoittaa Joptimizerin vaikutukset kalustolle kertyvään hukka-aikaan. Tämä valittiin tärkeimmäksi tarkastelun kohteeksi yhdessä toimipisteen muun henkilökunnan kanssa, sillä sen on katsottu parhaiten kuvaavan ajojärjestelijän onnistumista kaluston ohjaamisessa ja tuoden suoraan huomattavat hyödyt tuotannon tehokkuuteen. Hukka-aikaa katsotaan olevan tässä yhteydessä kahta eri tyyppiä: lastauskoneiden odotusaikaa ja louheautojen jonotusaikaa. Useimmiten ne korreloivat suoraan käänteisesti toisiaan, ja tavoitteena olisi löytää tasapainotilanne jossa molemmat ovat mahdollisimman alhaiset. Täydellisessä tilanteessa kuljetuskaluston määrää pystyttäisiin säättämään mielivaltaisesti sopimaan jokaiseen tilanteeseen, mutta käytännössä näin ei voida toimia, vaan louheautojen määrä on kohtalaisen kiinteä. Lastaus- ja kuljetuskaluston määrä on hankittu tyydyttämään kuukausittainen kuljetusbudjetti, mitkä sovitaan yhdessä Yara Suomi Oy:n kanssa. Optimointiajojen tarkoituksena on tutkia parantaako Joptimizerin käyttö Siilinjärven louhekaluston käytöstä, jos muihin muuttujiin ei pystytä merkittävästi vaikuttamaan. Mahdollisesti parantuvan tehokkuuden ansiosta sovitut budjetit voitaisiin periaatteessa toteuttaa pienemmällä kalustomäärällä. Tutkimus rajattiin koskemaan vain Jigsaw-järjestelmän parissa toimivia maansiirtoautoja ja lastauskoneita, sillä Joptimizer ei suoranaisesti voi vaikuttaa haamukaluston liikkeisiin. Kaksi Jigsaw-asennettua pyöräkuormaajaa jätettiin myös tutkimusten ulkopuolelle, sillä niiden katsottiin toimivan vuoden mittaan liian vaihtelevanlaatuissa töissä sekä esimerkiksi koeajojen alkuviikkoina lähes poikkeuksetta haamuautojen lastauskoneena aiheuttaen tarpeetonta tilastovääristymää.

6 TEHDYT KOEAJOT SIILINJÄRVELLÄ

6.1 Tutkimusmenetelmät ja järjestelyt

Tavoitteeksi otettiin Joptimizerin käyttö kaikilla viidellä pääkuokalla vähintään 80% ajasta. Optimoinnin ajallinen mittaaminen suoraan ei ole järjestelmässä mahdollista, joten optimoinnin käytön määrää päädyttiin mittaamaan maansiirtoautojen saamien osoitusten kautta. Osoituksella tarkoitetaan auton saamaa seuraavaa ajokohdetta aina kuorman kippaamisen tai lastauksen jälkeen. Tätä mittaamaan luotiin erillinen raportti Jview-tietokantaan.

Työmaalla pidettävät kahvi- ja ruokatauot yhdenaikaistettiin optimoinnin käytön helpottamiseksi, sillä huolena oli kuljetuskaluston ajautuvan huolimattomuuden takia satunnaisesti juuri tauolle siirtyvän lastauskoneen luo.

Ajojärjestelijöiden kesken käytiin läpi optimoinnin oikeaoppinen käyttö ja sen parametrien asettaminen, joten voidaan olettaa kaikkien eri toimihenkilöiden käyttävän järjestelmää jotakuinkin samalla tavalla. Joptimizerin käytöstä kirjoitettiin myös kirjallinen ohje ajojärjestelijöiden käyttöön muistin tukemiseksi ja ongelmakohtien läpikäymiseksi. Muita merkittäviä muutoksia työn järjestelyssä ei katsottu tarpeelliseksi, ja Joptimizerin ensimmäiset koeajot tehtiin lokakuun 2017 alusta lähtien. Pääasialliseen optimoinnin käyttöön siirryttiin 16.10.2017 alkaen. Haluttuja tärkeimpiä tunnuslukuja, eli kuokkien odotusaikaa ja maansiirtoautojen jonotusaikaa mittaamaan luotiin Jview-raportit.

6.2 Tulokset

Jview-raportista saatujen tietojen mukaan Joptimizeria käytettiin Siilinjärven kaivoksen maansiirtoautojen ohjaamiseen taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Joptimizerin ohjaamien osoitusten määrä kiviautoille viikoittain

| Viikko ja alkamispäivämäärä | Joptimizerin ohjaamien osoitusten määrä |
|------------------------------------|--|
| vko 40 (2.10.2017=>) | 48 % |
| vko 41 (9.10.2017=>) | 62 % |
| vko 42 (16.10.2017=>) | 77 % |
| vko 43 (23.10.2017=>) | 71 % |
| vko 44 (30.10.2017=>) | 66 % |
| vko 45 (6.11.2017=>) | 76 % |
| vko 46 (13.11.2017=>) | 71 % |
| vko 47 (20.11.2017=>) | 67 % |
| vko 48 (27.11.2017=>) | 75 % |
| vko 49 (4.12.2017=>) | 76% |
| vko 50 (11.12.2017=>) | 23% |
| vko 51 (18.12.2017=>) | 51% |
| vko 52 (25.12.2017=>) | 71% |

Tavoitetasoksi asetettiin 80%, mihin ei suoranaisesti päästy yhtenäkkään koeajoviikkona, mutta toimipaikan henkilökunnan kanssa katsottiin pääkuokkien olevan syytä olla optimoinnin ulkopuolella, jos niitä käytetään selkeästi erillisissä projekteissa kaivosalueella. Tällaisia olivat esimerkiksi rakenteiden purkamisprojektit ja rikastushiekka-altaiden patojen korotukset, mitkä yleensä vaativat pelkästään pienempien CAT 777F -maansiirtoautojen käyttämistä. Kaikki tällainen toiminta siis suoritettiin perinteisesti täysin lukittuna ajona, mikä suoraan aiheutti taulukossa 1 havaitut haluttua alhaisemmat optimointiprosentit. Tätä ei kuitenkaan katsottu ongelmaksi, ja saadut tuloksen katsotaan vertailukelpoisiksi. Viikon 50 huomattavasti muita viikkoja alhaisempi optimoinnintaso johtui pääasiällisen raakkulastauskohteen siirtymisestä muusta toiminnasta selvästi erilliseksi, mikä katsottiin muut olosuhteet huomioiden kannattavimmaksi suorittaa perinteisesti lukittuna ajona.

Viiden pääkuokan ja maansiirtoautojen ajankäyttöä ja tuotannon ominaislukuja tarkailtiin Jview-raporttien avulla koko testiajojen ajan. Vertailua tehtiin erityisesti marraskuun osalta, joka oli alusta loppuun toimittu Joptimizeria hyödyntäen, mutta myös joulukuun tuloksien voidaan katsoa olevan suuntaa-antavia, sillä optimointia käytettiin aina tilanteen niin salliessa. Todelliset toteutuneet tuotannon tunnusluvut on sovittu tilaajan kanssa salassa pidettäviksi, mutta optimizerin käytön vaikutukset tunnuslukuihin on listattu taulukossa 2. Muutoksien laatua on havainnollistettu väreillä: vihreä tarkoittaa positiivista muutosta ja punainen negatiivista muutosta.

Taulukko 2. Optimoinnin aikana havaitut muutokset

| | Syyskuu | Lokakuu muutos syyskuuhun | Marraskuu muutos syyskuuhun | Joulukuu muutos syyskuuhun | Lokakuu vrt. vuoden keskiarvoon | Marraskuu vrt. vuoden keskiarvoon | Joulukuu vrt. vuoden keskiarvoon |
|---|---------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Kuokkien odotusaikaprosentti | X | -3,68 prosenttiyksikköä | -4,86 prosenttiyksikköä | -5,14 prosenttiyksikköä | -0,03 prosenttiyksikköä | -1,22 prosenttiyksikköä | -1,49 prosenttiyksikköä |
| Maansiirtoautojen jonotusaikaprosentti lastaukseen verrattuna lastauskoneen lastausaikaan | X | +0,82 prosenttiyksikköä | +3,20 prosenttiyksikköä | +4,97 prosenttiyksikköä | -2,80 prosenttiyksikköä | -0,42 prosenttiyksikköä | +1,36 prosenttiyksikköä |
| Maansiirtoautojen jonotusaikaprosentti lastaukseen verrattuna niiden työskentelyaikaan | X | -0,47 prosenttiyksikköä | -0,81 prosenttiyksikköä | -0,59 prosenttiyksikköä | -0,32 prosenttiyksikköä | -0,67 prosenttiyksikköä | -0,43 prosenttiyksikköä |
| Kuokkien odotusprosentti + Autojen jonotusprosentti lastaukseen | X | -4,15 prosenttiyksikköä | -5,67 prosenttiyksikköä | -5,73 prosenttiyksikköä | -0,35 prosenttiyksikköä | -1,87 prosenttiyksikköä | -1,92 prosenttiyksikköä |
| Maansiirtoautojen lastattuna kuljettu osuus liikkeelläolajasta | X | +2,74 prosenttiyksikköä | +2,93 prosenttiyksikköä | +1,72 prosenttiyksikköä | +1,47 prosenttiyksikköä | +1,65 prosenttiyksikköä | +0,44 prosenttiyksikköä |
| Maansiirtoautojen lastattuna kuljettu osuus kokonaisajasta | X | +1,90 prosenttiyksikköä | +2,24 prosenttiyksikköä | +1,55 prosenttiyksikköä | +0,92 prosenttiyksikköä | +1,26 prosenttiyksikköä | +0,57 prosenttiyksikköä |
| Maansiirtoautojen kippauspaikalla jonotettu osuus | X | +1,13 prosenttiyksikköä | +1,51 prosenttiyksikköä | +1,88 prosenttiyksikköä | +0,41 prosenttiyksikköä | +0,79 prosenttiyksikköä | +1,16 prosenttiyksikköä |

Taulukossa 2 esitetyt havainnot on vielä listattu alla sanallisesti:

- Viiden pääkuokan keskiverto-odotusaikaprosentti pieneni syyskuusta lokakuuhun 3,68 prosenttiyksikköä. Tämä lokakuun arvo oli 0,03 prosenttiyksikköä vuoden keskiarvoa pienempi.
- Lokakuusta marraskuuhun keskiverto-odotusaika pieneni vielä 1,18 prosenttiyksikköä lisää. Tämä marraskuun arvo oli vuoden keskiarvoa 1,22 prosenttiyksikköä pienempi.
- Joulukuussa kuokkien odotusaika jatkoi laskuaan. Syyskuuhun verrattuna arvo oli jo 5,14 prosenttiyksikköä pienempi, ja vuoden keskiarvoon verrattuna 1,49 prosenttiyksikköä pienempi.
- Järjestelmän parissa toimivien maansiirtoautojen keskimääräinen jonotusaika lastaukseen kasvoi syyskuusta lokakuuhun 0,82 prosenttiyksikköä. Tämä oli silti 2,80 prosenttiyksikköä koko vuoden keskiarvoa pienempi. Laskennassa käytettiin laskukaavaa (kaava 1):

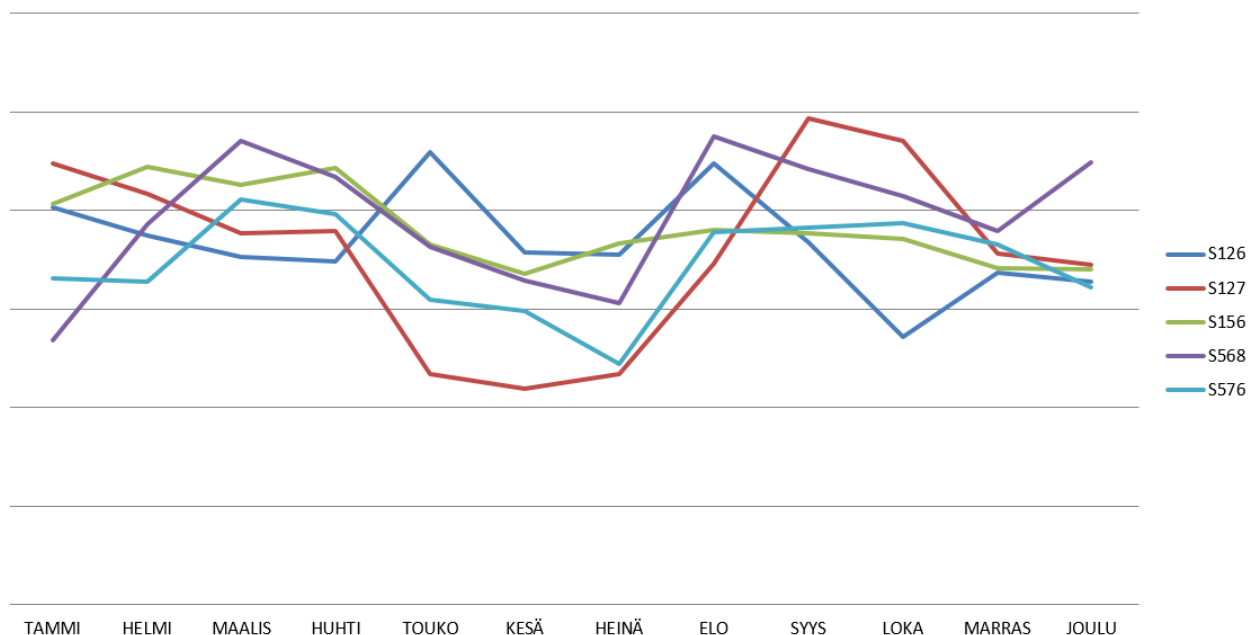
$$\text{Jonotusaikaprosentti} = \frac{\text{Autojen jonotusaika (s)}}{\text{Kuokan lastausaika (s)}} * 100\% \quad (\text{Kaava 1})$$

- Lokakuusta marraskuuhun tällä kaavalla laskettu jonotusaika lastaukseen kasvoi vielä 2,38 prosenttiyksikköä. Tämä oli yhä 0,42 prosenttiyksikköä vuoden keskiarvoa pienempi. Joulukuussa kasvu jatkui 4,97 prosenttiyksikköä syyskuuta ylemmälle tasolle. Tällöin oltiin jo 1,36 prosenttiyksikköä vuoden keskiarvon yläpuolella.

- Toinen tapa tarkastella maansiirtoautojen jonotusaikaa on verrata autojen kumulatiivista jonotusaikaa suoraan niiden omaan työskentelyaikaan. Tällöin käytetään laskukaavaa (kaava 2):

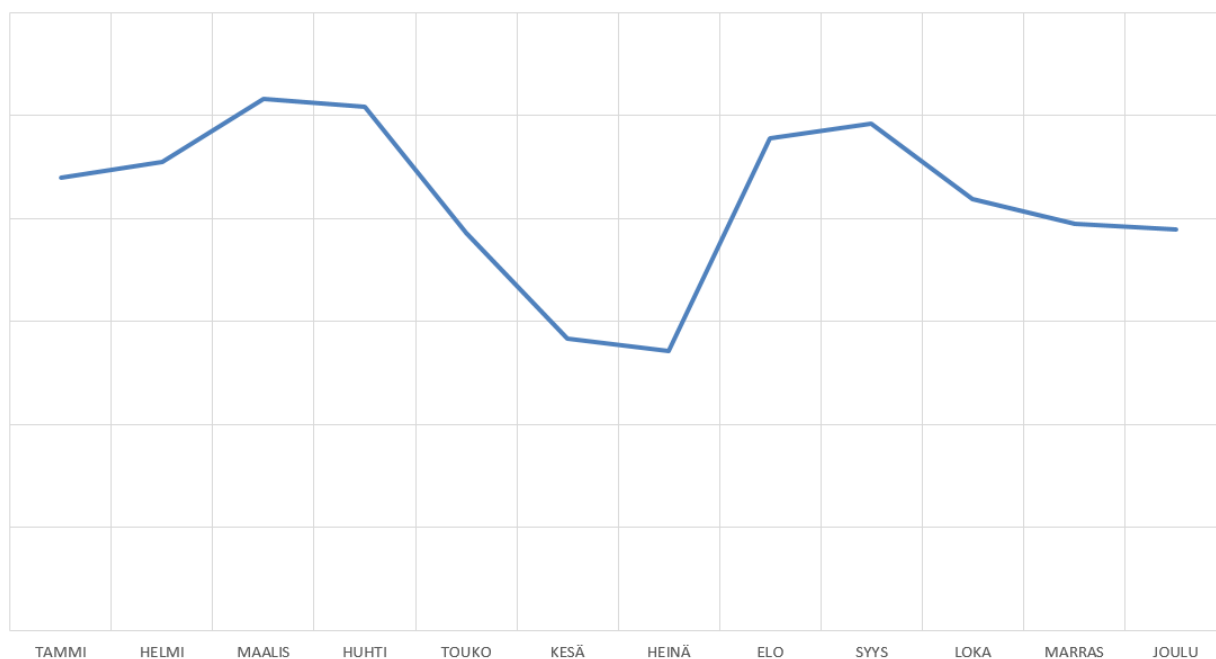
$$\text{Jonotusaikaprosentti} = \frac{\text{Autojen odotusaika (s)}}{\text{Autojen työskentelyaika (s)}} * 100\% . \quad (\text{Kaava 2})$$
- Tällä laskentatavalla saatiin lokakuussa 0,47 prosenttiyksikköä syyskuuta parempi tulos, ja marraskuussa 0,81 prosenttiyksikköä parempi tulos. Joulukuussa saatiin marraskuuta 0,22 prosenttiyksikköä huonompi arvo, mikä oli yhä 0,43 prosenttiyksikköä vuoden keskiarvoa parempi.
- Kuokkien odotusaika ja maansiirtoautojen jonotusaika korreloivat käänteisesti keskenään. Optimitalanteessa molempien itseisarvo tulisi olla lähellä nollaa. Lisäämällä kuokkien odotusprosentti ja autojen jonotusprosentti yhteen saadaan luku, joka kuvaa tuotannon järjestelyn onnistuneisuutta. Mitä pienempi tämä luku on, sen vähemmän kalustolla kertyy hukka-aikaa. Lokakuussa tämä ominaisluku laski syyskuuhun verrattuna 4,15 prosenttiyksikköä. Marraskuussa lasku jatkui 5,67 prosenttiyksikköä syyskuuta alemmalle tasolle, ja edelleen joulukuussa 5,73 prosenttiyksikköä syyskuuta pienemmäksi. Marraskuussa oltiin jo 1,85 prosenttiyksikköä ja joulukuussa 1,92 prosenttiyksikköä vuoden keskiarvoa alemmalla tasolla.
- Maansiirtoautojen lastattuna kuljettu osuus kaikesta liikkeelläoloajasta nousi lokakuussa 2,74 prosenttiyksikköä. Marraskuussa nousua tuli vielä 0,19 prosenttiyksikköä lisää. Joulukuussa palattiin 1,21 prosenttiyksikköä huonommalle tasolle, mutta yhä 0,44 prosenttiyksikköä vuoden keskiarvon yläpuolella.
- Lastattuna kuljettu keskimääräinen prosenttiosuus nousi syyskuusta lokakuuhun 1,9 prosenttiyksikköä, ja edelleen maaliskuuhun 0,34 prosenttiyksikköä. Joulukuun taso oli 0,89 prosenttiyksikköä marraskuuta huonompi.
- Maansiirtoautojen kippauspaikalla jonottaminen nousi huomattavasti optimoinnin aikana, syyskuusta lokakuuhun 1,13 prosenttiyksikköä, siitä marraskuuhun 0,38 prosenttiyksikköä ja edelleen joulukuuhun 0,37 prosenttiyksikköä. Joulukuun taso oli jo 1,16 prosenttiyksikköä vuoden keskiarvoa suurempi.

Viiden pääkuokan koko alkuvuoden kattava odotusaikojen vaihtelu on kuvattu kuvaajassa 1. Jokainen kuokka on kuvattu yksittäisesti. Kuvaajissa ei näytetä suoria arvoja tämän raportin yhteydessä.



Kuvaaja 1. Vuoden 2017 Siilinjärven kaivoksen viiden pääkuokan hukka-aikojen kehittyminen kuukausittain

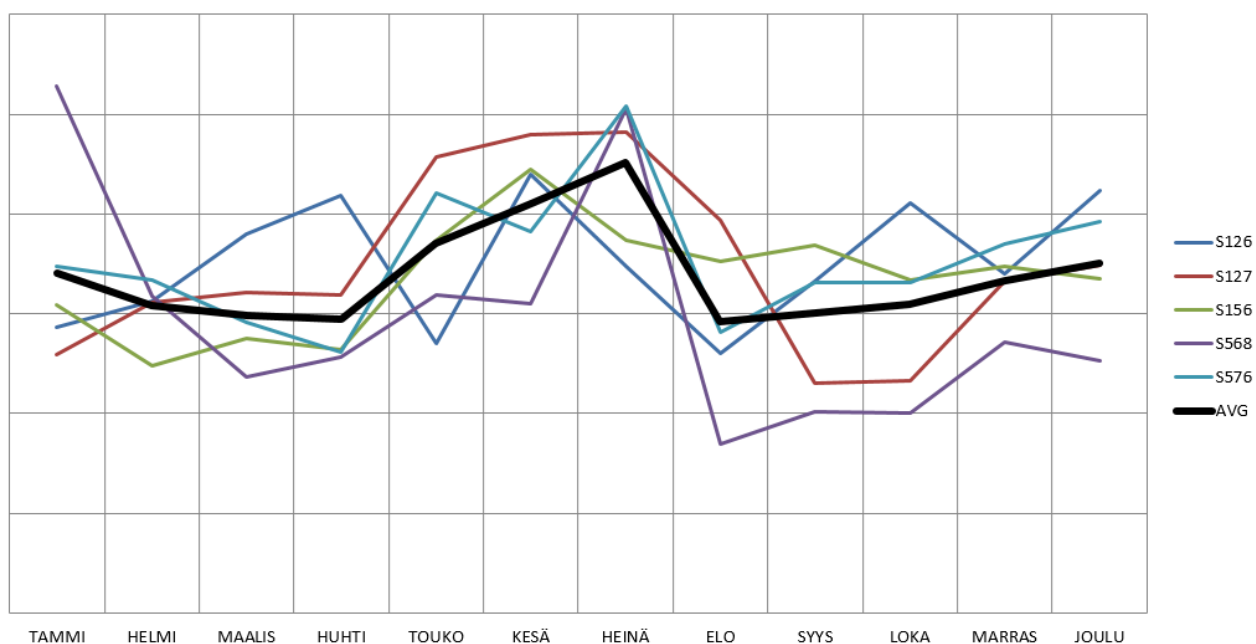
Kuvaajassa 2 esitetään viiden pääkuokan odotusajan keskiarvon kehittymistä vuoden 2017 ajalta. Kesäkuukausien arvot ovat selvästi parhaalla tasolla, mutta loka-, marras- ja joulukuun koeajojen aikana luvut ovat olleet selkeässä laskusuunnassa.



Kuvaaja 2. Viiden pääkuokan odotusajan osuuden keskiarvo kuukausittain vuonna 2017

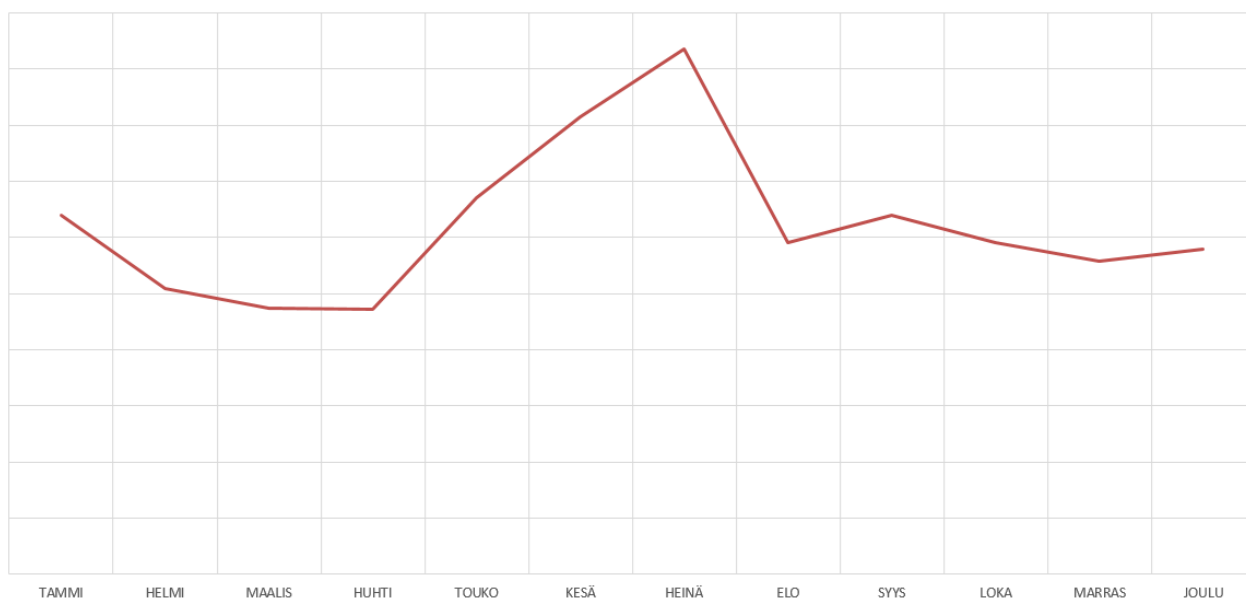
Maansiirtoautojen jonottaminen verrattuna lastausaikaan pääkuokkien luona on kuvattu kuvaajassa 3. Kuvaajassa on käytetty samoja värejä jokaiselle pääkuokalle kuin kuvaajassa 1, mutta lisäksi kuu-

kauden keskiarvo esitetään mustalla. Tärkeää huomata, että lastausaikaan verrattuna maansiirtoautojen jonotusajan osuus on lähtenyt lähes poikkeuksetta nousuun koeaikana.



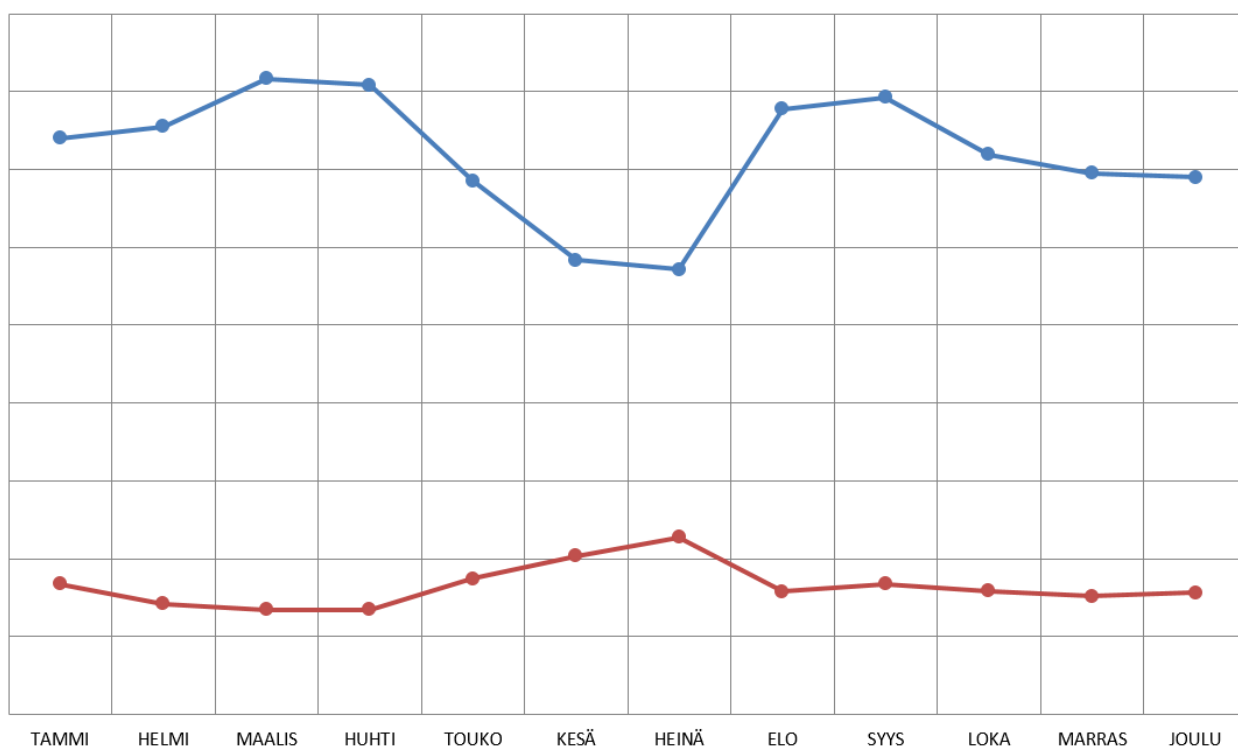
Kuvaaja 3. Maansiirtoautojen jonottaminen pääkuokkien luona verrattuna lastausaikaan vuonna 2017

Kuvaajassa 4 on esitetty maansiirtoautojen jonotusajan osuuden kehittyminen verrattuna niiden työaikaan. Kuvaajaan 3 verrattuna huomataan, että tällä laskutavalla tarkasteltuna autojen kokonaisjonotusajan osuus on laskenut koeaikana.



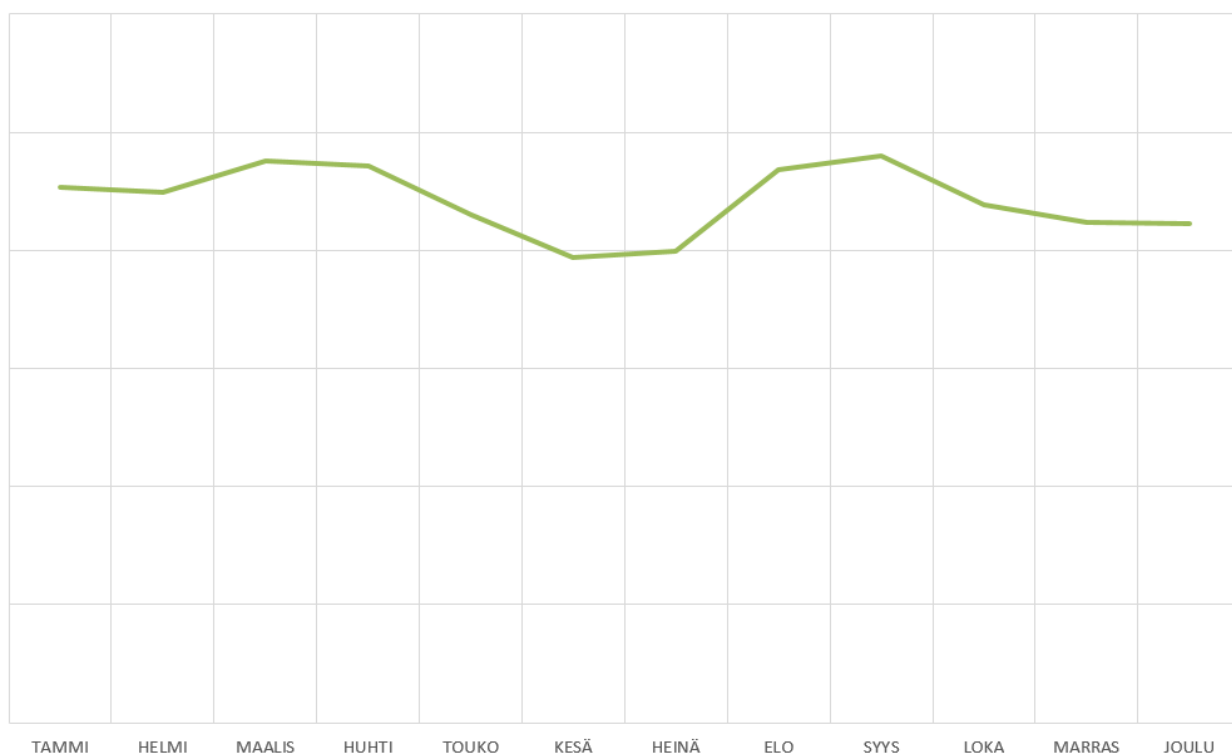
Kuvaaja 4. Maansiirtoautojen jonotusajan osuus niiden työajasta vuonna 2017

Kuvaajassa 5 esitetään kuvaajissa 2 ja 4 näytetyt lastauskoneiden ja maansiirtoautojen hukka-aikojen osuudet rinnakkain. Nämä hukka-ajat yleensä korreloivat käänteisesti keskenään, mutta koeaikana loka- ja marraskuussa voidaan havaita niiden yhtäaikainen lasku.



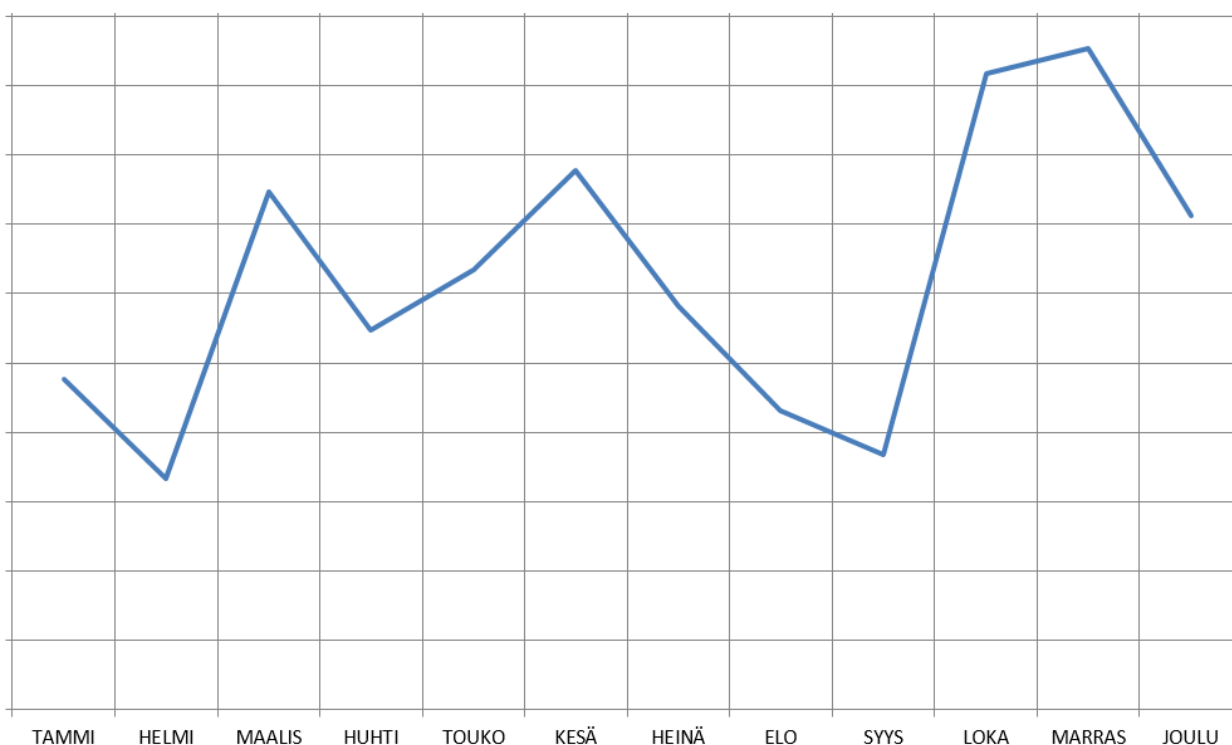
Kuvaaja 5. Sekä lastauskoneiden hukka-ajan osuus, että maansiirtoautojen jonotusajan osuus kuukausittain vuodelta 2017. Lastauskoneiden hukka-aikaa on kuvattu sinisellä ja maansiirtoautojen jonotusaikaa punaisella.

Kuvaajassa 6 on esitetty lastauskoneiden ja maansiirtoautojen odotus- ja jonotusaikojen summan kehittyminen vuoden 2017 aikana. Tämä tunnusluku on kehitetty tämän työn yhteydessä kuvaamaan tuotannon järjestelyn onnistumista, matalan arvon ollessa aina parempi. Kaikenlaisen hukka-ajan kertymistä kaikelle kalustolle pyritään aina välttämään. Kesäkuukausien tasolle ei päästy, mutta muutos koeajoja edeltävään tasoon on silti huomattava.



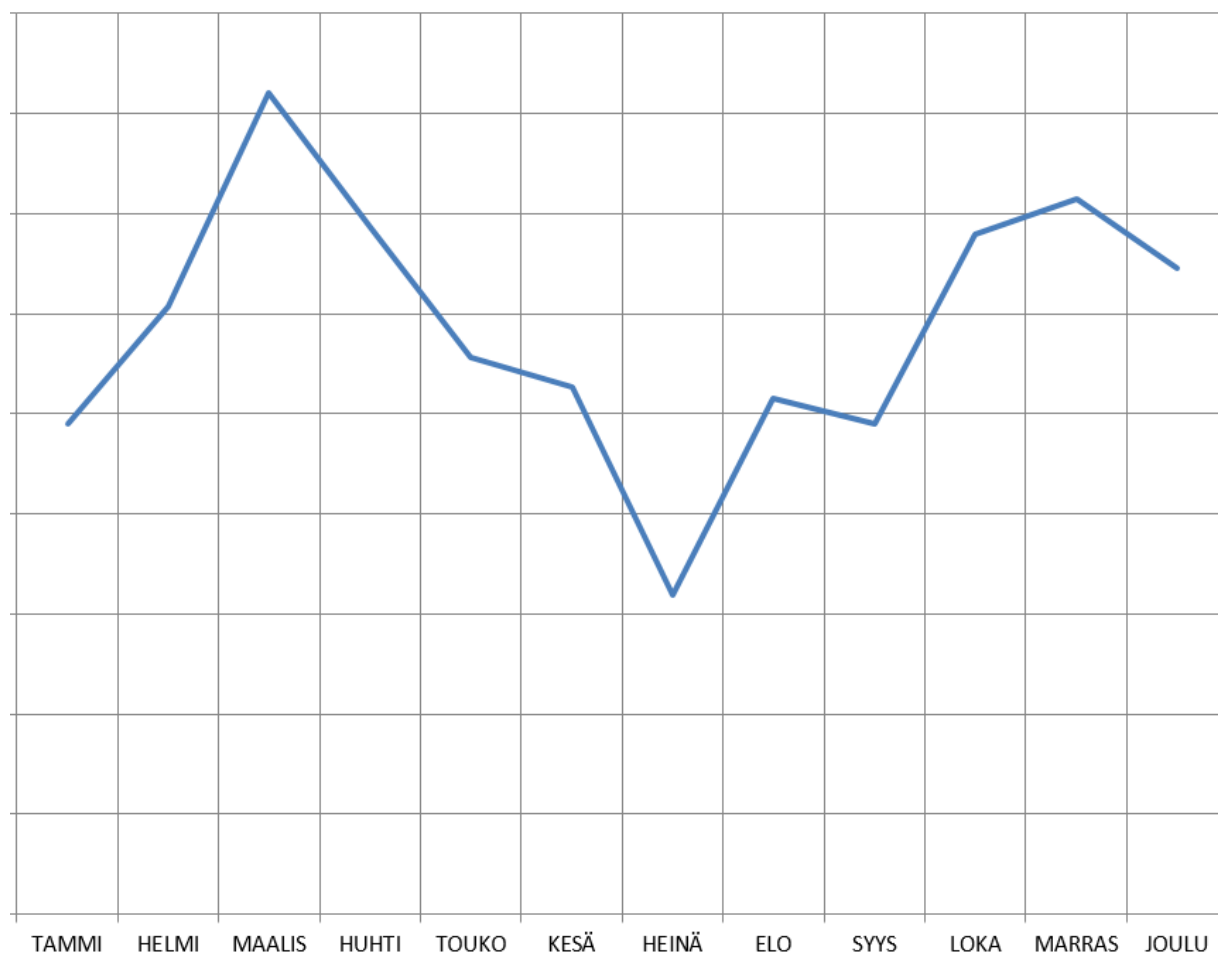
Kuvaaja 6. Lastauskoneiden ja maansiirtoautojen hukka-aikaprosenttien yhteenlaskettu summa kuukausittain vuodelta 2017

Kuvaajassa 7 esitetään maansiirtoautojen lastattuna kulkema aika verrattuna kaikkeen liikkeelläolokaan. Korkeamman arvon voi sanoa olevan lähtökohtaisesti parempi, sillä ainoastaan kuljettaessaan materiaalia on auto sille tarkoitetussa tuottavassa työssä.



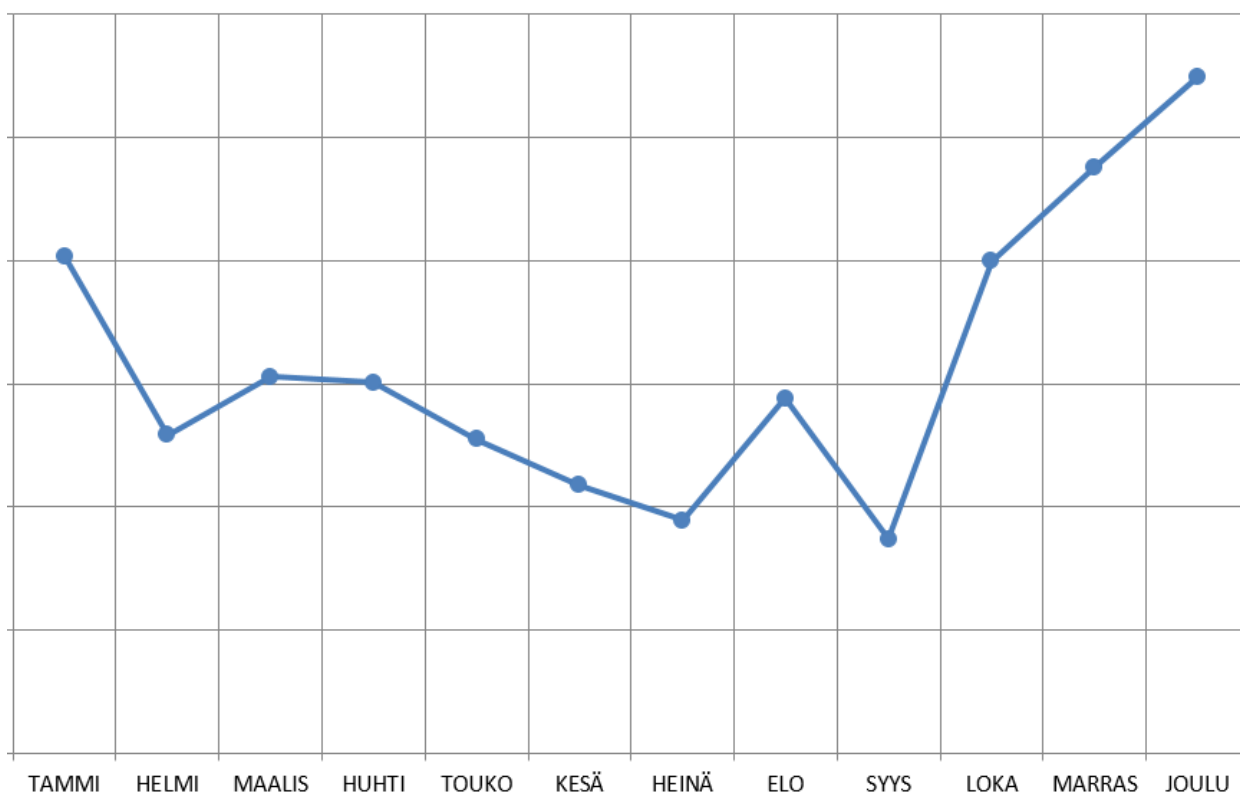
Kuvaaja 7. Maansiirtoautojen lastattuna kuljettu aika verrattuna kaikkeen liikkeelläolokaan vuonna 2017

Kuvaajassa 8 esitetään maansiirtoautojen lastattunaoloaika verrattuna kokonaisaikaan. Tässäkin tarkastelussa voidaan sanoa korkeamman arvon olevan tuotannon kannalta parempi.



Kuvaaja 8. Maansiirtoautojen lastattunaoloaika verrattuna kokonaisaikaan vuonna 2017

Kuvaajassa 9 esitetään maansiirtoautojen kippauspaikalla jonottaman ajan osuus kokonaisaikaan. Optimointiajon aikana loka- ja marraskuussa voidaan havaita selkeä nousu vuoden muihin kuukausiin verrattuna. Tammikuu oli ollut myös huonolla tasolla yksittäisenä poikkeuksena.



Kuvaaja 9. Maansiirtoautojen kipauspaikalla jonottaman ajan osuus kokonaisajasta vuonna 2017

6.3 Havainnot

Optimoinnin käyttöönotto osoittautui verrattain haastavaksi, ja erityisesti koeajojen alkutaipaleella maansiirtoautojen saamat osoitukset olivat liian usein epätoivotunlaisia. Tällaisia osoituksia olivat muun muassa peräkkäin samalle lastauskoneelle palaavat autot, yhden lastauskoneen epäsuhtainen suosiminen sekä kahden auton yhtäaikainen tarpeeton lastauskoneen "ristiin" vaihtaminen, mikä usein aiheutti molemmille autoille pidentyneen ajomatkan ja tyhjänä kohtaamisen. Ajojärjestelijöiden kanssa näitä tilanteita tarkkailemalla ja niihin johtaneita syitä pohtimalla luotiin kuitenkin tarkennettuja ohjeita Siilinjärven ajojärjestelijöiden käyttöön. Uusia ohjeita ja toimintatylejä seuraten voitiin havaita selvien virhetilanteiden väheneminen koko kolmen kuukauden koeajon aikana, mutta toimipaikan olosuhteista johtuen (kuten laajalle hajautettu lastauskalusto ja ajokohteet) ei kaikkiin tilanteisiin voitu luoda selkeää varmatoimista optimointiohjetta. Sen sijaan Siilinjärvellä otettiin käyttöön joukko "nyrkisääntöjä" tilanteisiin, joissa optimointia ei ole mielekästä ottaa käyttöön. Nämä lisättiin ajojärjestelijoille jaettavaan optimointiohjeeseen.

Joptimizerin käyttö vaikutti positiivisesti lastauskoneiden hukka-aikaan, minkä voidaan loogisesti sanoa lisäävän suoraan saatavaa tuotantomäärää samoilla resursseilla. Täysin luotettavia tuotannon määrän vertailuja on kuitenkin mahdotonta tehdä, sillä koeajojen aikaan havaittiin budjettiin verrattuna huonoja tuloksia. Tämä yhdessä lastauskoneiden pienentyneen hukka-ajan kanssa ovat keskenään loogisessa ristiriidassa. Ilmiötä selittäviä syitä on listattu seuraavassa:

- Epäonnistuneiden räjäytysten myötä lastausnopeuksien lasku
- Tarkasteltujen viiden pääkuokan kuukausittaisen työtuntien lasku

- Viidestä pääkuokasta kolmen kokoluokaltaan suurimman lastauskoneen käyttösuhteen lasku syys-elokuuhun verrattuna. Tuotannon painottuessa pienimmille lastauskoneille saadaan aikaan vähemmän lastattuja tonneja.
- Keskimääräisen lastaustehon lasku marraskuulle ajoittuneen pääkuokalla suoritettua pitkäkestoisien tienpurun takia
- Ensipakkasten ajoittuminen koeajalle aiheuttaen lastauskoneissa rasvariongelmia ja lukuisia tuotantokatkoksia
- Lastauskoneiden mahdollisesti parantunut asettaminen pois tuotantotilasta taukojen yms. aikaan, mikä johtaa suoraan laskennallisesti pienempiin hukka-aikoihin. Kattavaa aineistoa käyttötottumusten parantumisista ei tämän työn yhteydessä vielä saatu.
- Maansiirtoautojen lisääntynyt jonotus kippauspäässä, mikä tosin on ristiriidassa lastauskoneiden pienentyneen hukka-ajan kanssa, sillä automäärä ei lisääntynyt koeaikana
- Maansiirtoautojen lisääntynyt pitäminen pois tuotannosta rikkoontumisten tai operaattorin puuttumisen takia, mutta varmaa aineistoa ei tämän työn yhteydessä ollut saatavilla.

Syksyyn ja talvikauden alkuun sijoittunut koeajo ei ollut paras mahdollinen aika saada luotettavia tuloksia optimoinnin käytöstä, mutta lisäksi myös Siilinjärvellä samaan aikaan Yaran käynnistämä YPS-projekti toi osaltaan tietynlaista sekavuutta muuten rutiininomaiseen työskentelyyn, eikä esimerkiksi tuotannon heilahteluihin aina ehditty paneutua tarpeeksi syvällisesti.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Viiden pääkuokan odotusaikaprosentti laski kolmen kuukauden mittaisen optimointiajon aikana sitä edeltäneeseen kuukauteen verrattuna yli viisi prosenttiyksikköä. Marraskuussa päästiin jo noin puoli-toista prosenttiyksikköä kuluvaan vuoden keskiarvon alapuolelle, mitä voidaan pitää hyvänä tulokseksi. Touko-, kesä-, heinäkuun aikaiselle tasolle ei koeajon aikana päästy, mutta Siilinjärven tuotannon tyypillistä on lievä kausiluonteisuus, kesän ollen aina vilkkainta aikaa. Louheen kuljetukseen varattujen maansiirtoautojen keskimääräinen lukumäärä katsottiin olleen kesällä suurempi, mikä voidaan myös havaita kuvaajasta 5. Kesäkuukausien aikana maansiirtoautojen jonotusmäärä on vuoden korkeimmalla tasolla, ja vastaavasti lastauskoneiden hukka-aika vuoden alhaisimmalla tasolla. Koeaikana saavutettu lastauskoneiden hukka-ajan lasku on lähes verrattavissa keväällä tapahtuneeseen laskuun, mutta maansiirtoautojen jonotusaika ei kasvanut, vaan päinvastoin laski samanaikaisesti.

Koeaikana havaittiin usein Joptimizerin käytön aiheuttavan kahden maansiirtoauton palaavan peräkkäin saman lastauskoneen luo. Käytännössä tämä on mahdollista myös täysin lukitussa ajossa, kun samalta lastauskoneelta ajavat autot saavat eri materiaalia olevat kuormat ja kuljettavat ne eri kippauspaikalle, mutta Siilinjärven toimihenkilöiden kesken havaittiin tämän ilmiön silmämääräinen lisääntyminen Joptimizerin käytön seurauksena. Tarkastelemalla kuvaajia 3 ja 4 voidaan havaita tämän myös pitävän paikkaansa. Kuvaajan 3 esittämällä tavalla vertaamalla maansiirtoautojen jonotusaikaa kuokan lastausaikaan on koeaikana saadut tulokset kehittyneet huomontaan suuntaan. Samanaikaisesti autojen kokonaisjonotusaika lastauskoneen luona on kääntynyt lievään laskuun, kuten voidaan nähdä kuvaajasta 4. Tämä voidaan katsoa johtuvan lähes yksinomaan ilmiöstä, jossa kaksi maansiirtoautoa palaa hyvin samanaikaisesti samalle lastauskoneelle. Kuvaajassa 3 esitetty laskukaava antaa suuria jonotusaikaprosentteja, jos heti lastauksen alkaessa on seuraava auto jo valmiiksi saapunut jonottamaan omaa vuoroaan. Joptimizerin periaatteena on kuitenkin lähettää auto sen lastauskoneen luo, mistä se saa sillä hetkellä edullisimman eli nopeimman kuorman. Kuvaajassa 4 nähtävä lievä kokonaisjonotusajan osuuden lasku vahvistaa tämän väitteen. Joissain tilanteissa on edullisempaa lähettää kaksi autoa yhtäaikaaisesti samalle tehokkaalle kuokalle, verrattuna siihen että lähettäisi toisen niistä hakemaan epäedullisempaa kuormaa esimerkiksi kauempaa.

Lastauskoneiden odotusaika korreloi yleensä käänteisesti maansiirtoautojen jonotusajan kanssa. Pie-nellä kuljetuskapasiteetillä lastauskone joutuu odottamaan lastausten välissä, ja kuljetuskapasiteettiä lisäämällä alkaa jossain vaiheessa autoja muodostua jonoksi lastauskoneen luo. Tavoitteena on luonnollisesti tilanne, jossa molemmantyyppiset hukka-ajat on saatu minimoitua. Vuoden 2017 elokuusta syyskuu ovat malliesimerkkejä tilanteesta, jossa autot eivät ehdi muodostaa jonoja, mutta lastauskoneille kertyy normaalia enemmän hukka-aikaa (ks. kuvaaja 5). Kesän ajalta arvot taas ovat juuri päinvastaisia. Tämän myötä on usein järkevää tarkastella myös lastauskoneiden ja autojen yhteenlaskettua jonotus- ja odotusaikaa.

Loka-joulukuussa optimointiajojen aikana maansiirtoautojen ja lastauskoneiden hukka-aikaprosenttien yhteenlaskettu summa putosi heti lokakuussa alle vuoden 2017 keskiarvon ja jatkoi laskuaan

marraskuun ja joulukuun ajan. Kuvaajasta 6 voidaan havaita kesäkuukausien olleen yhä paremmalla tasolla, mutta tässä tulee huomata lastauskoneiden hukka-ajan saavan tässä laskennassa enemmän painoarvoa, sillä se omaa luontaisesti suuremman itseisarvon. Tämä taas selittyy esimerkiksi sillä, että jopa optimiolosuhteissa seuraavan maansiirtoauton peruutus lastaukseen keskeyttää lastauksen väliaikaisesti aiheuttaen lastauskoneelle näennäistä hukka-aikaa. Käytännössä tämän yhteenlasketujen hukka-aikojen muodostaman tunnusluvun laskun voidaan katsoa tarkoittavan kuljetuskaluston tasaista ja järkevää jakaantumista eri aikoina eri lastauskoneille, jolloin tuotannon voidaan sanoa lähestyvän optimaalista tilannetta. Suurin vaikutus tämän tunnusluvun kehittymiseen tulee suunnittelun puolelta, sillä esimerkiksi kuljetus- ja lastauskapasiteetin määrä on suuripiirteisesti määrätty jo ennen optimoinnin aloittamista. Tulokseen voidaan kuitenkin olla tyytyväisiä, ja optimoinnin aloituksen voidaan havaita laskeneen yhteenlaskettua hukka-aikaa välittömästi (kuvaaja 6).

Maansiirtoautojen lastattuna kuljettu osuus liikkeelläoloajasta nousi optimointiaikana vuoden ennätyslukemiin, mihin voidaan olla erittäin tyytyväisiä. Toisaalta joulukuussa palattiin normaalimmalle tasolle, mutta myös ajoreitit muuttuivat joulukuussa huomattavasti. Joptimizerin oleellisena osana tiedettiin olevan autojen ohjaus tuotannollisesti tehokkaimman lastauskoneen luo lastausta varten, jolloin autojen kuormattuna kulkeman ajan tulisi lähteä teoriassa nousuun. Saatujen tuloksien perusteella tämä näyttää toimivan myös käytännössä. Saadut arvot on tosin mitattu maansiirtoautojen käyttämän ajan perusteella, sillä matkan mittaaminen ei tutkimushetkellä ollut mahdollista, joten esimerkiksi ylämäkeen lastattuna kuljettava matka ja alamäkeen tyhjänä palattava matka aiheuttaa suoraan lastattuna kuljetun ajan osuuden kasvua. Tunnusluvun muutos syyskuusta lokakuuhun on suurin koko vuoden aikana havaittu, ja marraskuussa sen arvo nousi vielä hieman lisää. Vaikka olosuhteet olisivatkin muuttuneet arvoa parantavaan suuntaan, on myös optimoinnin käytöllä ollut positiivista vaikutusta saatuun tulokseen.

Maansiirtoautojen lastattuna olo kokonaisaikaan verrattuna nousi myös huomattavasti verrattuna optimointia edeltäneeseen tasoon. Kuvaajasta 8 voidaan havaita saavutetun tason olevan silti maaliskuuta alempana, minkä on mahdollisesti aiheuttanut esimerkiksi maaliskuussa tehdyt meno-paluu kuljetukset. Aikaan perustuvien mittauksien haittapuolena on niiden huono vertailukelpoisuus olosuhteiden muuttuessa, mikä on kaivosalalla enemmänkin sääntö kuin poikkeus. Suunta on kuitenkin ollut koeaikana selkeästi positiivinen autojen käyttäessä suuremman osan ajastaan tuottavaan työhön eli materiaalin kuljetukseen.

Osittain kuljetukseen käytetyn osuuden jäämistä parhaasta mitatusta tasosta selittää kuvaajassa 9 havaittu selkeä maansiirtoautojen kippauspaikalla jonotukseen käyttämän ajan nousu. Tämän luonteeltaan negatiivisen muutoksen syitä on pohdittu toimipisteen henkilökunnan kanssa. Selittäviksi syiksi löydettiin ajojärjestelijöiden lisääntynyt passiivisuus murskalla jonottavien autojen välivarastoon ohjaamisen suhteen, sekä sivukiviläjityksellä juuri koeaikana aloitettu nousurampin rakennustyö, joka etenkin työn alkuvaiheessa on aiheuttanut jonotustarpeen muodostumista. Toimipisteellä on tehty tarvittavat korjaavat toimenpiteet tilanteen palauttamiseksi halutulle tasolle.

8 KEHITYSEHDOTUKSET HAVAINTOJEN POHJALTA

Kaivostuotannolle ominaiseen tapaan myös Siilinjärven kaivoksella tuotannon tunnusluvut vaihtelevat voimakkaasti lyhyidenkin aikajaksojen sisällä, eikä kahta täysin samanlaista vuoroa ole. Pitkällä aikavälillä ja esimerkiksi kuukausitasolla mahdolliset erot toimintatavoissa nousevat kuitenkin esiin, ja kolmen kuukauden otannan perusteella Joptimizerin hyödyntämistä on syytä jatkaa tulevaisuudessaakin. Jatkuva tarkkailua järjestelmän toimimisen suhteen tulee kuitenkin harjoittaa, ja esimerkiksi tätä tutkimusta varten Mikko Pelttarin tuottamat Jview-raportit ovat tehokkaita työkaluja tuotannon tunnuslukujen vertailuun ja tarkkailemiseen. Tuotannon tehokkuuden tarkkailusta ja jatkuvaan parantamiseen pyrkimisestä tulikin tämän työn tuloksena arkipäivää Siilinjärven ajojärjestelijöiden ja työnjohtajien keskuudessa.

Päällimmäiseksi huomioksi hukka-aikojen tarkastelun perusteella nousee tuotannon suunnittelun tärkeys jo kauan ennen optimoinnin pääsyä vaikuttamaan. Koeajon aikana havaittiin myös optimoinnin käytön muuttuminen käytännössä tarpeettomaksi tilanteissa, joissa lastaus ja kippauskohteet sijaitsevat kaukana toisistaan ns. erillisinä projekteina. Siilinjärven kaivoksella tällaiset tilanteet ovat käytännössä päivittäisiä. Jos tulevaisuudessa halutaan käyttää Joptimizerin täyttä potentiaalia, tulisi pyrkiä mahdollisuuksien mukaan suunnittelemaan tuotantoa siten, että mahdollisimman moni lastauskohde sijaitsisi toistensa lähellä olevilla kaivosalueilla. Käytännössä paras tilanne olisi, jos louheen kuljetusreitit kulkisivat samojen tieosuuksien kautta edes hetkellisesti, jolloin autot voisivat sujuvasti vaihtaa toiselle reitille uuden osoituksen tullen. Tällaisissa tilanteissa maansiirtoautot pystyvät optimoinnin ohjaamina luontevasti vaihtamaan seuraavaa lastauskohdetta ”lennosta” ja tuotanto pysyy lähempänä optimaalista tilannetta kuin täysin lukittuna ajona. Epävarmuustekijöitä on kuitenkin edelleen havaittavissa satunnaisesti niin kentällä kuin itse Jigsaw-järjestelmässäkin, joten ensisijaisen tärkeää on ajojärjestelijän aktiivinen tuotannonseuranta, sekä omaan kokemukseen perustuva tuotannon käsiohjaus ja tilanteiden ennakointi.

9 YHTEENVETO

Työlle asetettiin tavoitteeksi Jigsaw-järjestelmän optimointityökalun ottaminen tehokkaasti käyttöön, ja tässä myös onnistuttiin. Joptimizerin ottaminen osaksi tuotannonohjausta Siilinjärven kaivoksella on alkanut hiljalleen vakiinnuttaa asemaansa koko henkilökunnan keskuudessa. Kolmen kuukauden mittainen koeajo on Siilinjärven kaivoksen mittakaavassa lyhyt, mutta siitä saaduista tuloksista voidaan havaita positiivisia kehityksen merkkejä. Kaikki toimipisteen ajojärjestelijät ovat harjaantuneet Joptimizerin käytössä, ja siitä on tämän koeajon tuloksena tullut tehokas työkalu tuotannon ohjaamisen avuksi. Toimipisteellä on opittu tunnistamaan tilanteet, joissa optimoinnin käytöstä saadaan selvää hyötyä, ja toisaalta ymmärtämään sen soveltuvuuden tietty rajallisuus. Tilanteita joissa optimoinnin käyttäminen tuottaa kohtuuttomasti virheitä ja työllistää näin turhaan ajojärjestelijää ja muuta henkilökuntaa, sekä pahimmissa tapauksissa suoria tuotantotappioita, tulee Siilinjärvellä eteen järjestelmällisesti. Tällaiset tilanteet on opittu koeajojen aikana tunnistamaan, ja oikeat toimintatyylit myös niiden hoitamiseksi on luotu.

Koeajojen aikana havaittiin kaluston hukka-aikojen pääasiallista laskua, joitakin tiettyjä poikkeuksia lukuun ottamatta. Tuotannon kannalta ehdottomasti tärkein tunnusluku on lastauskoneiden odotusaika, minkä havaittiin loka–joulukuussa laskevan huomattavasti. Samanaikaisesti tapahtui myös maansiirtoautojen jonotusajan lievää laskua. Tällainen molempien hukka-aikatyypin yhdenaikainen lasku on katsottu harvinaiseksi kehityssuunnaksi. Mahdollisten laskeneiden tuotantotulosten ei näin ollen voida katsoa johtuvan optimoinnin käytöstä.

Loka–joulukuussa yhdessä ajojärjestelijöiden kanssa huomattiin, että vuorotasolla ylivoimaisesti yleisin tilanne oli se, että kaksi viidestä pääkuokasta voitiin perustellusti ottaa optimoinnin piiriin. Näissä tilanteissa optimoinnin ohjaamien maansiirtoautojen lukumäärän huomattiin yleensä vaihtelevan noin kahdeksan ja kahdentoista välillä, muiden ollen perinteisesti lukittuna esimerkiksi erillisiin erikoisprojekteihin. Näin rajallisen kalustomäärän ohjaamisessa optimoinnilla ei saavuteta vielä merkittäviä etuja, mutta toimipisteen ajojärjestelijät ovat silti nyt valmiimpia ohjaamaan tarvittaessa suurempaakin kalustomäärää Joptimizerin tuomaa etua hyödyntäen.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

PAALUMÄKI, Tauno, LAPPALAINEN, Pekka ja HAKAPÄÄ, Antero 2015. Kaivos- ja louhintatekniikka. 3. painos. Tampere: Juvenes Print Oy.

ENBUSKE, Henri. 2017-11-1. Ajojärjestelijä. [Haastattelu.] Siilinjärvi: E. Hartikainen OY.

PELTTARI, Mikko. 2017-10-15. Työmaainsinööri. [Haastattelu.] Siilinjärvi: E. Hartikainen OY.

KOSONEN, Eero. 2017-11-3. Louhosasiantuntija. [Haastattelu.] Siilinjärvi: Yara Suomi Oy.

Hartikainen.com [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-9-27] Saatavissa: <http://www.hartikainen.com/maarakennus/>

Hartikainen.com [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-9-27] Saatavissa: <http://www.hartikainen.com/maarakennus/nykyiset-urakat/>

Hartikainen.com [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-9-27] Saatavissa: <http://www.hartikainen.com/maarakennus/yhtio/>

Yara.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-9-27] Saatavissa: <http://www.yara.fi/tietoa-yarasta/about-yara-local/>

Hexagonmining.com [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-9-29] Saatavissa: <http://hexagonmining.com/about-us/summary>

Hexagonmining.com [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-9-29] Saatavissa: <http://hexagonmining.com/products/operations-suite>

Hexagonmining.com [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-9-29] Saatavissa: <http://hexagonmining.com/products/all-products/jview>

Leica-geosystems.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-9-29] Saatavissa: http://www.leica-geosystems.fi/fi/Yrityksemme_789.htm

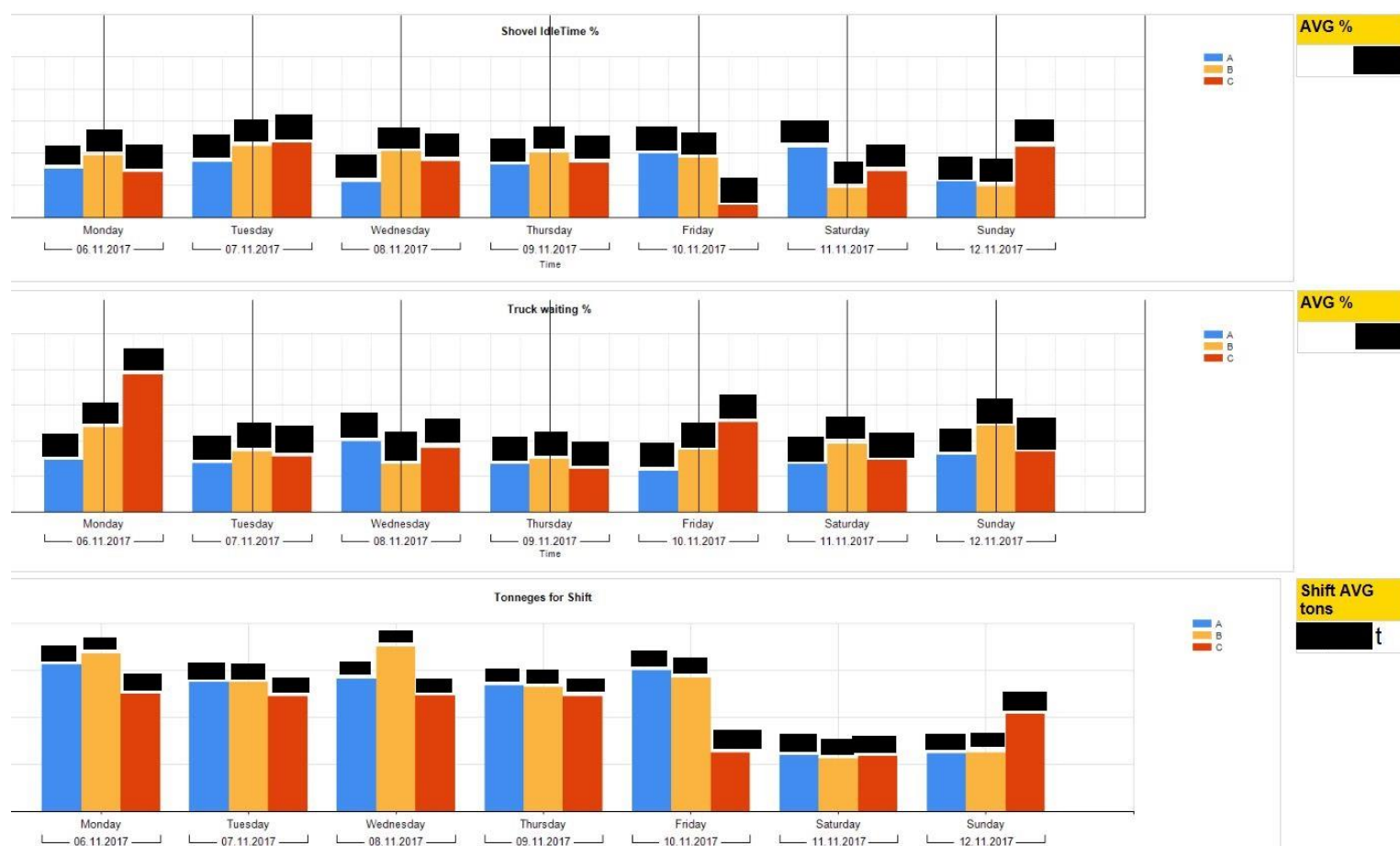
AFRAPOLI, Ali Moradi ja ASKARI-NASAB, Hooman 2017. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms. International Journal of Mining, Reclamation and Environment. [viitattu 2018-3-29] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1080/17480930.2017.1336607>

LIITE 1: ESIMERKKI JVIEW-TIETOKANNASTA OTETUSTA EXCEL-TIEDOSTOSTA

| Equipment | time | shift | idle % | WaitingAvg % | AVG Trucks Per Shovel | max Queue | readyhours | Ready (s) | Idle (s) |
|-----------|------------|-------|--------|--------------|-----------------------|-----------|------------|-----------|----------|
| S127 | 01.01.2017 | A | | | | | | | |
| S156 | 01.01.2017 | B | | | | | | | |
| S568 | 01.01.2017 | B | | | | | | | |
| S576 | 01.01.2017 | C | | | | | | | |
| S156 | 01.01.2017 | C | | | | | | | |
| S127 | 02.01.2017 | A | | | | | | | |
| S576 | 02.01.2017 | A | | | | | | | |
| S126 | 02.01.2017 | A | | | | | | | |
| S127 | 02.01.2017 | B | | | | | | | |
| S156 | 02.01.2017 | B | | | | | | | |
| S568 | 02.01.2017 | B | | | | | | | |
| S126 | 02.01.2017 | B | | | | | | | |
| S576 | 02.01.2017 | B | | | | | | | |
| S576 | 02.01.2017 | C | | | | | | | |
| S568 | 02.01.2017 | C | | | | | | | |
| S156 | 02.01.2017 | C | | | | | | | |
| S126 | 02.01.2017 | C | | | | | | | |
| S156 | 03.01.2017 | A | | | | | | | |
| S126 | 03.01.2017 | A | | | | | | | |
| S127 | 03.01.2017 | A | | | | | | | |
| S568 | 03.01.2017 | A | | | | | | | |
| S127 | 03.01.2017 | B | | | | | | | |
| S156 | 03.01.2017 | B | | | | | | | |
| S126 | 03.01.2017 | B | | | | | | | |
| S568 | 03.01.2017 | B | | | | | | | |
| S156 | 03.01.2017 | C | | | | | | | |

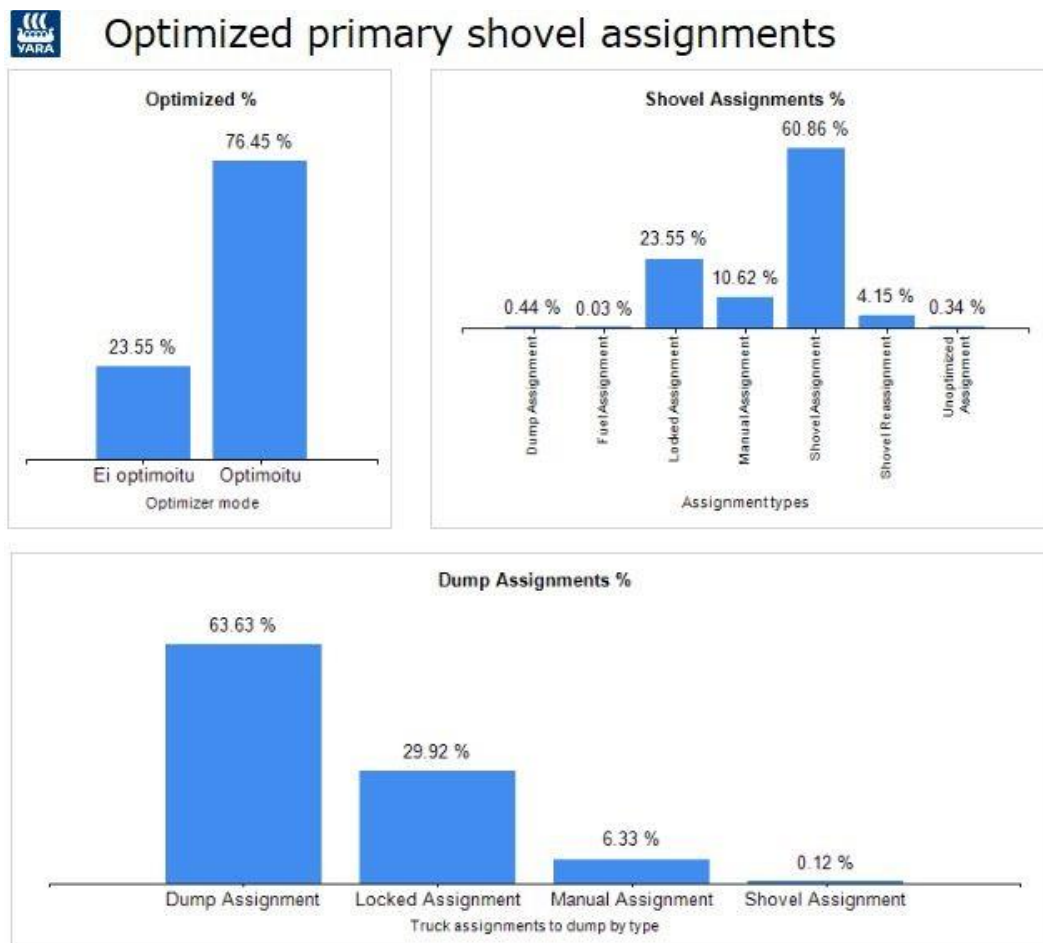
Kuvakaappaus 1. Jview- tietokannasta exceliin tuotua dataa, tunnusluvut poistettu tässä yhteydessä

LIITE 2: ESIMERKKI JVIEW-TIETOKANTAAN LUODUSTA RAPORTISTA



Kuvakaappaus 2. Esimerkki Jview-tietokantaan luodusta raportista. Aiheena kuokkien odotusaika, autojen jonotusaika ja vuorossa saavutettu tonnimäärä

LIITE 3: ESIMERKKI J-VIEW-RAPORTIN TAVASTA ESITTÄÄ OPTIMOINTIMÄÄRÄÄ



Kuvakaappaus 3. Optimoitujen osoitusten määrä tietylle ajanjaksolle Jview-raportista